This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

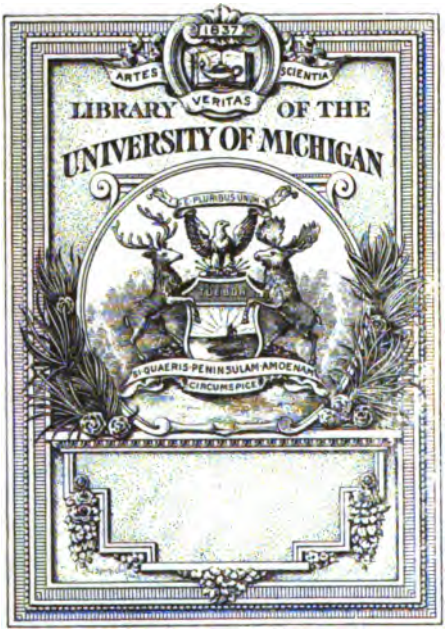
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`


1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE

QC
21
.P368
1847

3482

TRAITÉ

ELÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

TOME II

AVIS DES ÉDITEURS.

Tout exemplaire de cet ouvrage non revêtu de notre griffe, sera réputé contrefait.

L. Hachette et Cie

Paris. — Imprimerie Pauckoucke, rue des Poitevins, 14.

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

PAR E. PÉCLET

INSPECTEUR GÉNÉRAL DE L'UNIVERSITÉ

PROFESSEUR A L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES

OUVRAGE AUTORISÉ

Par le Conseil royal de l'Université

Quatrième Édition

revue et augmentée

TOME SECOND

L. HACHETTE ET Cie

LIBRAIRES DE L'UNIVERSITÉ ROYALE DE FRANCE

A PARIS

RUE PIERRE-SARRAZIN, N° 12

(Quartier de l'École de médecine)

A ALGER

RUE DE LA MARINE, N° 117

(Librairie centrale de la Méditerranée)

1847

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

SECONDE PARTIE.

FLUIDES IMPONDÉRABLES.

(SUITE.)

CHAPITRE II.

MAGNÉTISME.

§ 1er. *Phénomènes généraux.*

796. La plupart des mines de fer dans lesquelles ce métal n'est pas au maximum d'oxydation jouissent de la propriété d'attirer le fer, le nickel, le cobalt et le chrôme. On les désigne sous le nom d'*aimants naturels* ou *pierres d'aimant.*

797. Lorsqu'on plonge un aimant dans la limaille de fer, elle s'y attache; lorsqu'on la présente à une certaine distance, elle s'élance sur lui. L'attraction se manifeste également malgré l'interposition d'un corps quelconque, dans le vide comme dans l'air. On peut facilement constater l'action des aimants dans ces différentes circonstances, en suspendant un fil de fer par son milieu à un fil de soie, et lui présentant à distance, et derrière un corps quelconque, un aimant naturel, et en plaçant ce petit appareil sous une cloche dans laquelle on fait le vide.

La propriété des aimants d'attirer le fer a été connue des Grecs. C'est même du nom grec des aimants (μάγνης) que dérive le nom de *magnétisme*, que porte l'ensemble des phénomènes dont il s'agit. Les premières notions qui nous ont été transmises sur le magnétisme viennent de Pythagore; mais il paraît que ces connaissances remontent chez les Chinois à une époque beaucoup plus reculée.

798. *Pôles.* En observant un aimant, après qu'il a été roulé dans la limaille de fer, on trouve que ce métal ne s'est pas fixé uniformément sur sa surface, qu'il s'est plus particulièrement ramassé autour de deux points opposés, où la vertu magnétique paraît principalement résider, et qu'on a désignés sous le nom de *pôles*. En présentant successivement les différents points d'un aimant à l'aiguille de fer dont nous venons de parler, on reconnaît de même que le maximum d'attraction a lieu vers les extrémités. A partir des pôles, l'action va en s'affaiblissant à mesure qu'on s'approche du milieu de l'aimant, où elle est nulle; la ligne de la surface de l'aimant où l'action magnétique est insensible porte quelquefois le nom de *ligne neutre*.

799. Si l'on suspend un aimant naturel par un fil, de manière que la ligne qui passe par les pôles soit horizontale (fig. 453), on remarque que, l'aimant étant libre, la ligne des pôles se dirige à peu près parallèlement au méridien; si on la dérange de cette position, elle y revient en faisant des oscillations plus ou moins nombreuses.

800. Lorsqu'on approche deux aimants dont l'un est suspendu comme nous venons de le dire, on observe qu'un même pôle de l'un d'eux attire un des pôles du second aimant et repousse l'autre; que les pôles qui se repoussent sont ceux qui se dirigent naturellement, ou tous deux vers le nord, ou tous deux vers le sud, et que ceux qui s'attirent sont, au contraire, ceux qui dans chaque aimant isolé se tournent vers des points opposés de l'espace. Il résulte de là que dans les aimants les pôles de même nature se repoussent, et que ceux de nature différente s'attirent. On peut expliquer la tendance de la ligne des pôles d'un aimant à se diriger parallèlement au méridien, en regardant la terre comme un aimant dont les pôles magnétiques sont situés, l'un dans l'hémisphère boréal, l'autre dans l'hémisphère austral. Le pôle boréal d'un aimant sera alors celui qui se tourne vers le sud, et son pôle austral, celui qui se dirige vers le nord.

801. Si l'on brise un aimant naturel en deux parties, de manière que dans chacune d'elles se trouve un des pôles de l'aimant entier, chaque partie acquiert un nouveau pôle opposé au premier; et, en général, quand on brise un aimant naturel en un nombre quelconque de parties, chaque fragment devient un aimant complet possédant deux pôles.

802. *Communication de la vertu magnétique.* Lorsqu'on plonge un aimant dans de la limaille de fer, les parcelles de fer qu'il entraîne sont placées les unes à la suite des autres (fig. 434). Ce fait ne peut s'expliquer qu'en admettant que chaque parcelle de fer devient un aimant par son contact direct avec l'aimant naturel ou avec la parcelle métallique qui la précède. C'est d'ailleurs ce que l'on peut vérifier en suspendant à un aimant un petit fil de fer doux (fig. 435) : son extrémité libre acquiert un pôle de même nature que celui de l'aimant auquel l'autre extrémité est fixée, et peut soutenir un second fil de fer qui présente les mêmes phénomènes; mais chacun de ces fils ne conserve ses pôles qu'autant qu'il est fixé à l'aimant; aussitôt qu'il en est détaché, il cesse d'attirer le fer.

803. Un aimant naturel agit aussi sur l'acier et la fonte de fer, combinaison de fer et d'une petite quantité de charbon, de soufre, de silice, de phosphore et d'arsenic. Ces corps acquièrent plus difficilement la faculté magnétique que le fer doux; mais ils la conservent. Le nickel et le cobalt sont dans le même cas que le fer; comme lui, ils conservent leur polarité, lorsqu'ils sont combinés avec une petite quantité de charbon, de soufre, de phosphore, d'arsenic ou d'étain; mais, sous le même volume et la même forme, le fer est plus magnétique que le nickel et le cobalt.

Ainsi, parmi les substances magnétiques, il faut bien distinguer celles qui sont simplement magnétiques et celles qui sont aimantées. Les premières sont toujours attirées par les deux pôles d'un aimant; les autres ont toujours deux pôles permanents qui sont attirés par ceux de noms différents, et repoussés par ceux de même nom des aimants auxquels on les soumet.

804. L'acier et les autres métaux magnétiques n'éprouvent ni augmentation ni diminution de poids par l'aimantation : il suit de là que la vertu magnétique n'est pas due à un corps pondérable. Dans l'aimantation, la cause, quelle qu'elle soit, qui produit les pôles, ne passe pas de l'aimant à l'acier : car l'aimant, après son action, n'a rien perdu de sa force. Le caractère essentiel

de la cause du magnétisme est donc d'être impondérable et de n'être pas transmissible.

805. On appelle *aimants artificiels* des barreaux d'acier auxquels on a communiqué des pôles magnétiques par des aimants naturels ou par d'autres aimants artificiels. Les aimants artificiels se comportent exactement, et dans toutes les circonstances, comme les aimants naturels; et comme ils se prêtent à toutes les formes possibles, on peut s'en servir pour observer avec précision les phénomènes de direction que nous avons reconnus dans les aimants naturels. Une aiguille aimantée a ordinairement la forme d'une losange (fig. 458); elle est garnie à son centre d'une petite chape en cuivre ou en agate, au moyen de laquelle on la suspend sur un pivot (fig. 459).

806. *Déclinaison.* Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée sur une pointe ou par un fil, ou qu'on la place sur un corps flottant à la surface d'un liquide, on remarque, comme nous l'avons déjà dit, qu'une des extrémités se dirige sensiblement vers le nord. Mais la direction de l'aiguille ne coïncide pas avec le méridien géographique : l'angle formé par la direction de l'aiguille avec celle du méridien porte le nom de *déclinaison.* Cet angle varie de grandeur et de position suivant les lieux, et dans le même lieu avec le temps. La déclinaison est maintenant à Paris d'environ 22° ouest. Dans un même lieu, les aiguilles aimantées qui sont assez distantes pour ne pas réagir l'une sur l'autre prennent des directions sensiblement parallèles. On désigne sous le nom de *méridien magnétique* le plan qui passe par le centre de la terre et par les pôles de l'aiguille horizontale.

807. *Inclinaison.* Si on suspend une aiguille non aimantée par un axe horizontal passant par son centre de gravité (fig. 460), elle reste en équilibre dans toutes les positions possibles; mais si, après l'avoir aimantée, on la dirige dans le méridien magnétique, l'aiguille prend une position dans laquelle elle reste en équilibre stable. Ce phénomène remarquable a été découvert par Robert Norman en 1576. Le plus petit des deux angles formés par la direction de l'aiguille avec la ligne horizontale porte le nom d'*inclinaison.* L'inclinaison est maintenant à Paris d'environ 70°, et c'est le pôle austral [800] qui s'abaisse au-dessous de l'horizon.

808. *Isochronisme des oscillations d'une aiguille aimantée, soumise à l'action seule de la terre.* Lorsqu'une aiguille aimantée, suspendue sur une pointe fine ou à un fil de cocon, est très-peu

dérangée de sa position d'équilibre, elle y revient en faisant autour de cette position des oscillations isochrones, comme celles d'un pendule dérangé de sa position verticale. Il résulte de ce fait que les forces qui sollicitent l'aiguille sont à chaque instant proportionnelles à l'angle d'écart [58], et, par suite, qu'elles ont à chaque instant une direction constante : car alors les composantes de ces forces, perpendiculaires à la direction de l'aiguille, sont proportionnelles au sinus de la déviation, ou à l'angle de déviation même, quand elle est très-petite.

Cette conséquence de l'isochronisme des oscillations des aiguilles aimantées a d'ailleurs été constatée directement par l'expérience au moyen de la balance de torsion [124]. En fixant à l'extrémité du fil une aiguille aimantée, de manière qu'elle soit dans le méridien magnétique quand le fil est sans torsion, et en tournant le fil du micromètre de manière à faire prendre à l'aiguille différentes positions, on trouve que l'angle de torsion est proportionnel à l'angle de déviation.

809. *Les forces provenant du magnétisme terrestre qui sollicitent une même aiguille aimantée sont égales, parallèles et opposées, et ne peuvent lui imprimer aucun mouvement de translation.* En effet, si l'action magnétique du globe pouvait imprimer un mouvement de translation à une aiguille aimantée, ce serait en vertu d'une force qu'on pourrait toujours décomposer en deux, l'une verticale, l'autre horizontale. La première pourrait se reconnaître et se mesurer en pesant une aiguille avant et après l'aimantation : la différence de poids serait exactement la mesure de la composante verticale. Or on ne trouve point de différence : donc la composante verticale est nulle. Quant à la composante horizontale, si elle existait, on la reconnaîtrait facilement au moyen de l'appareil (fig. 461), dans lequel l'aiguille *ab* est placée à l'extrémité d'une lame non magnétique MN librement suspendue par un fil de soie. On voit à l'inspection de la figure que, s'il existait une force de translation horizontale, l'aiguille ne prendrait pas la même direction que si elle était suspendue par son centre; or on ne trouve aucune différence.

810. Il résulte de tout ce qui précède que, si une aiguille aimantée était librement suspendue par son centre de gravité, de manière à pouvoir prendre toutes les positions possibles autour de ce point, cette aiguille, étant sollicitée par des forces égales, parallèles et opposées, appliquées à deux points voisins des extrémités, prendrait nécessairement la direction de ces forces; mais si l'ai-

guille n'était point suspendue par son centre de gravité, le poids de l'aiguille se combinerait avec les forces magnétiques pour déterminer sa position d'équilibre. Si l'aiguille était suspendue horizontalement, de manière qu'elle ne pût se mouvoir qu'autour d'un axe vertical, elle se dirigerait dans le méridien magnétique, et serait alors seulement sollicitée par les composantes horizontales du magnétisme terrestre. Si l'aiguille était assujettie à se mouvoir dans un même plan vertical, ce qui arriverait si elle était mobile autour d'un axe fixe horizontal, elle ne serait plus sollicitée que par les composantes dirigées suivant ce plan : par conséquent, elle se dirigerait suivant la projection des forces magnétiques terrestres sur ce plan. Il est facile de voir d'après cela que l'inclinaison de l'aiguille sera d'autant plus grande que l'angle du plan avec le méridien magnétique sera plus considérable; et que, quand ce plan sera perpendiculaire au méridien magnétique, l'aiguille deviendra verticale. On peut facilement déduire de là que, si l'aiguille ne pouvait se mouvoir que dans un plan perpendiculaire à la direction des forces du magnétisme terrestre, elle resterait en équilibre dans toutes les positions possibles.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que l'aiguille était mobile autour de son milieu; les résultats seraient encore les mêmes si l'aiguille était mobile autour d'un autre point de son plan. Par exemple, si l'aiguille (fig. 462) était fixée à l'extrémité d'une tige non magnétique MN librement suspendue, l'action du globe ferait tourner la tige de manière à amener l'aiguille dans le méridien magnétique. En effet, en désignant par *m* et *n* les centres magnétiques des deux moitiés de l'aiguille, les forces appliquées à ces points sont égales, parallèles, et tendent à faire tourner l'aiguille *ab* autour du point O dans des sens opposés; mais comme elles sont appliquées à des distances inégales de ce point, on voit que l'aiguille tournera jusqu'à ce qu'elle soit parallèle à la direction des forces. Il est facile de voir qu'il en serait de même si l'aiguille, au lieu d'être placée sur le prolongement MN, avait toute autre direction relativement à cette tige, excepté pourtant le cas où l'aiguille serait verticale (fig. 463) : car alors, les moments de rotation étant égaux dans toutes les positions possibles, l'aiguille pourrait rester en équilibre dans une position quelconque.

§ 2. *Lois des attractions et des répulsions magnétiques.*

811. Les attractions et les répulsions magnétiques suivent exactement la raison inverse des carrés des distances. On doit à Coulomb la découverte de ce fait important; c'est au moyen de la balance de torsion [124] qu'il parvint à le mettre en évidence. Coulomb plaça à l'extrémité du fil de suspension (fig. 484) un étrier dans lequel il introduisit d'abord une tige non magnétique, pour mettre la ligne de repos correspondante au zéro de la division du micromètre sur celui de la cage; et pour placer cette ligne de repos dans le méridien magnétique, il remplaça la tige non magnétique par une aiguille aimantée, et tout l'appareil fut tourné jusqu'à ce que la position d'équilibre de l'aiguille correspondît au zéro de la division.

Alors Coulomb commença par déterminer la force directrice de l'aiguille, c'est-à-dire la force qu'il fallait employer pour la maintenir à une certaine distance angulaire du méridien magnétique. Pour cela il tordit le fil de suspension, en faisant tourner l'aiguille du cadran *ab* : pour chaque distance angulaire la force directrice était évidemment représentée par le nombre de degrés parcourus par l'aiguille du micromètre, diminué de la déviation de l'aiguille. Coulomb reconnut alors, comme nous l'avons déjà dit, que la force directrice était proportionnelle au sinus de la déviation, ou à la déviation elle-même, quand elle est très-petite. Cette loi peut d'ailleurs se déduire du seul fait que l'action exercée par la terre sur les pôles d'une aiguille a une direction constante : car une aiguille magnétique qui oscille dans un plan quelconque est exactement dans le même cas qu'un pendule soumis à l'influence de la pesanteur.

Coulomb fixa ensuite dans la cage de la balance et dans une position verticale, un barreau aimanté, dont le pôle placé à la hauteur de l'aiguille était de même nom que le pôle voisin de cette dernière. L'aiguille horizontale fut repoussée, et, en tordant le fil de suspension par l'index du micromètre, il rapprocha les aimants à différentes distances. Pour chacune d'elles la force répulsive était égale à la torsion du fil augmentée de la force directrice : alors, en comparant ces forces aux distances, la loi énoncée fut mise en évidence. Nous rapporterons une des séries d'expériences faites par Coulomb.

L'aiguille mobile avait 15 pouces de long, 1 ligne et demie de

diamètre; la force directrice pour 1° était de 35° de torsion, et les distances des deux aimants étaient de 24°, 17° et 12°, pour les torsions micrométriques de 0°, 3 circonférences et 8 circonférences. Les forces directrices étaient donc, dans ces trois expériences, de $24 \times 35 = 840$, de $17 \times 35 = 595$, et de $12 \times 35 = 420$; et les torsions étaient 24°, $17 + 3 \times 360 = 1097$ et $12 + 360 \times 8 = 2892$; et, par conséquent, les forces qui faisaient équilibre aux répulsions étaient $24 + 840$, $595 + 1097$, et $420 + 2892$, ou 864, 1692, 2313 : or ces nombres sont sensiblement dans le rapport inverse des carrés des nombres 24, 17, 12, qui mesurent les distances des pôles des aimants : car, pour de petits angles, on peut prendre les arcs pour les cordes.

812. Les lois des attractions et des répulsions magnétiques pourraient aussi être déterminées en faisant osciller une aiguille sous l'influence d'un aimant que l'on placerait successivement à diverses distances de l'aiguille; mais il faudrait encore avoir égard à l'influence du magnétisme terrestre. Nous exposerons en détail cette méthode, en parlant de la mesure de la force magnétique des aimants.

Dans toutes ces expériences, on doit toujours choisir des aimants très-longs, afin de pouvoir négliger l'action des pôles les plus éloignés, et on doit les prendre en acier fortement trempé, pour que l'action mutuelle des aimants ne puisse développer de nouveau magnétisme dans aucun d'eux.

§ 3. *Détermination de la force magnétique des aimants.*

813. La méthode qui paraît la plus simple et la plus directe pour comparer la force des aimants naturels et artificiels est de les mettre en contact avec une même pièce de fer, supportant une coupe de balance que l'on charge successivement jusqu'a ce qu'elle se détache de l'aimant; mais cette méthode ne peut donner qu'une approximation grossière. Elle fut cependant la seule usitée jusqu'en 1780, époque à laquelle Coulomb y substitua d'autres méthodes susceptibles d'une grande précision, mais qui ne sont applicables qu'à la détermination du magnétisme d'une même aiguille ou d'aiguilles égales.

814. *Méthode des oscillations.* Si on suspend une aiguille aimantée à un fil sans torsion, et qu'on écarte l'aiguille du méridien magnétique, nous avons vu qu'elle oscille autour de cette position;

alors l'intensité de la force qui la sollicite est proportionnelle, comme dans le pendule, au carré du nombre d'oscillations qu'elle fait dans le même temps.

En désignant par F la composante horizontale de l'intensité magnétique de la terre, par F′ et par F″ les intensités magnétiques d'une même aiguille dans deux circonstances différentes, par T et T′ les durées des oscillations, et par n, n', les nombres d'oscillations exécutées par l'aiguille dans le même temps, les forces qui solliciteront l'aiguille seront proportionnelles à FF′ dans le premier cas et à FF″ dans le second; et, comme les éléments magnétiques de l'aiguille sont sollicités par des forces parallèles qui restent constantes, ces oscillations suivent des lois analogues à celles d'un pendule soumis à l'action de la pesanteur : alors, en remplaçant dans l'équation du pendule [58] la valeur de g par KFF′ et KFF″, K étant un nombre constant, on trouve

$$\frac{F'}{F''} = \frac{T'^2}{T^2} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

815. Lorsque l'aimant ne peut pas être suspendu, on le fait agir, dans ses différents états magnétiques, sur une même aiguille suspendue horizontalement, à la même distance; il faut que l'aiguille ait été fortement trempée, afin que son état magnétique ne soit point changé d'une manière permanente par l'influence de l'aimant. On commence d'abord par faire osciller l'aiguille sous l'influence seule de la terre, et ensuite sous l'influence réunie de la terre et de l'aimant, l'aimant étant placé dans le méridien magnétique. On déduit alors facilement des nombres d'oscillations faites dans le même temps les rapports des intensités magnétiques de l'aimant.

En désignant, comme précédemment, par F la composante horizontale du magnétisme terrestre, par F′ et par F″ les intensités du magnétisme de l'aimant dans deux états différents, par f celle de l'aiguille, par k et k' deux coefficients constants, par n, n', n'', les nombres d'oscillations de l'aiguille libre, et soumise successivement à l'influence de la terre et de l'aimant dans ces deux états, nous aurons les équations

$$\frac{kFf + k'F'f.}{kFf.} = \frac{n'^2}{n^2} \quad \text{et} \quad \frac{kFf + k'F''f.}{kFf.} = \frac{n''^2}{n^2}.$$

La première donne

$$k'F'f = kFf\left(\frac{n'^2 - n^2}{n^2}\right),$$

la seconde

$$k'F''f = kFf\left(\frac{n''^2 - n^2}{n^2}\right);$$

d'où l'on tire

$$\frac{k'F'f}{k'F''f} = \frac{F'}{F''} = \frac{n'^2 - n^2}{n''^2 - n^2}.$$

La même méthode peut servir à vérifier les lois des attractions et des répulsions magnétiques ; il suffit pour cela de faire varier la distance du barreau aimanté, son intensité restant constante.

Dans ce cas, $F' = F''$; mais la distance du barreau à l'aiguille étant différente, la force qui sollicite l'aiguille est représentée par $k'F'f$ et $k''F''f$, k' et k'' étant des coefficients différents qui dépendent de la distance : alors on a

$$\frac{k'}{k''} = \frac{n'^2 - n^2}{n''^2 - n^2},$$

et l'on trouve par l'observation que k' et k'' sont en raison inverse des carrés des distances. Nous rapporterons une des expériences de Coulomb.

Il suspendit une petite aiguille à un fil de soie, et, à l'abri des agitations de l'air, elle faisait quinze oscillations par minute. Il fit ensuite agir sur elle le pôle attractif d'un long fil d'acier fortement aimanté et maintenu verticalement dans le méridien magnétique de l'aiguille ; l'extrémité du fil d'acier qui agissait sur l'aiguille s'abaissait de 10 lignes environ au-dessous du plan horizontal de l'aiguille ; cette disposition était nécessaire pour obtenir le maximum d'effet : le fil étant à 4 pouces de distance du centre de l'aiguille, elle fit quarante et une oscillations en une minute, et, le fil étant placé à 8 pouces, le nombre des oscillations fut réduit à vingt-quatre. D'après la formule précédente on a

$$\frac{k'}{k''} = \frac{(41)^2 - (15)^2}{(24)^2 - (15)^2} = 4,1.$$

Ainsi, à une distance double, l'intensité de la force est quatre fois plus petite.

816. On peut aussi déterminer le rapport des intensités magnétiques d'une même aiguille au moyen de la balance de Coulomb, en mesurant la torsion qu'il faut donner au fil de suspension pour que l'aiguille éprouve la même déviation. En supposant que les pôles soient toujours aux mêmes points, il est facile de voir que les intensités magnétiques de l'aiguille sont proportionnelles aux arcs de torsion.

§ 4. *Distribution du magnétisme dans un barreau aimanté.*

817. Lorsqu'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on remarque, comme nous l'avons déjà dit, que la limaille s'attache surtout à ses extrémités : il en résulte que la vertu magnétique réside principalement dans les points voisins des extrémités.

818. On peut déterminer la distribution du magnétisme dans un barreau par le procédé suivant. On prend une très-petite aiguille, et, après avoir déterminé le nombre des oscillations qu'elle

fait dans une minute, lorsqu'elle est soumise à l'influence seule de la terre, on la présente successivement aux différents points d'un barreau aimanté AB (fig. 465). On détermine pour chaque position le nombre d'oscillations qu'elle fait dans le même temps, et, par suite, l'intensité du magnétisme qui concourt avec l'action de la terre pour faire osciller l'aiguille : cette intensité est proportionnelle à celle du point de la barre situé dans le plan horizontal de l'aiguille. En effet, le point M, situé à la hauteur de l'aiguille ab, sera celui dont l'action se fera sentir davantage : d'abord parce qu'il est le plus voisin de l'aiguille, ensuite parce qu'il l'attire directement dans le plan horizontal où elle oscille, au lieu que les autres points situés au-dessus et au-dessous agissent de plus loin et plus obliquement. A la vérité, l'influence de ces deux causes est très-faible pour les points du barreau qui avoisinent M ; mais si l'action d'un de ces points est plus forte que celle de M, celle du point situé de l'autre côté, à la même distance, sera plus faible d'une quantité à peu près égale : car, quelle que soit la nature de la courbe A'B'C', dont les ordonnées représentent les intensités magnétiques des points correspondants du barreau, on peut toujours, lorsqu'on n'en considère qu'une très-petite étendue, lui substituer la ligne droite qui joint les points extrêmes. Ainsi, la demi-somme des actions exercées par les points voisins équidistants de M sera encore très-peu différente de celle de M. Il suit de là que, dans chaque expérience, le barreau exercera une action presque proportionnelle à celle du point M ; mais cette proportionnalité ne pourra pas s'étendre jusqu'à l'extrémité du barreau, ni même à une très-petite distance de cette extrémité : car alors les points situés au delà devenant assez voisins pour que leur absence soit sensible, l'action exercée sur l'aiguille ne serait plus la même que si le barreau était continué. A l'extrémité du barreau la force est à peu près deux fois plus petite que s'il était prolongé : c'est pourquoi il faut doubler les résultats obtenus. Dans ces expériences, l'aiguille doit être assez forte pour que son état magnétique ne soit pas changé d'une manière permanente par l'influence du barreau.

819. On pourrait aussi employer la balance de torsion. Coulomb se servait, pour ce mode d'expérience, de l'appareil (fig. 464). L'aiguille aimantée mobile étant sur le zéro de la division et dans le méridien magnétique, il fixait verticalement dans la cage et contre cette aiguille, dans sa position d'équilibre, une règle de bois de 2 millimètres d'épaisseur, et il plaçait contre cette règle, et

de l'autre côté, un barreau vertical dont le pôle de même nom que celui de l'extrémité la plus voisine de l'aiguille était à la hauteur de cette aiguille; en faisant glisser le barreau verticalement contre la règle, on amenait successivement ses différents points en regard du pôle de l'aiguille, et dans chaque position elle était écartée de sa direction d'un angle plus ou moins considérable; alors, au moyen du micromètre, on la ramenait à sa position initiale, et la force de répulsion était mesurée par la torsion nécessaire pour produire cet effet. Pour diminuer le nombre des oscillations, Coulomb employait un petit étrier en cuivre (fig. 466), terminé inférieurement par une lame de cuivre qui plongeait dans un vase plein d'eau. Il faudrait encore, comme dans la méthode précédente, doubler l'intensité obtenue à l'extrémité, puisqu'on obtiendrait un effet sensiblement double si l'aimant se prolongeait au delà.

820. Coulomb a fait un grand nombre d'expériences pour déterminer la variation de la force magnétique dans les différents points d'un barreau aimanté; il a trouvé qu'en général la force magnétique était nulle au milieu; que de là elle croissait très-lentement jusqu'à une certaine distance, d'où elle augmentait avec une très-grande rapidité jusqu'aux extrémités, et qu'à distances égales du centre, les forces magnétiques étaient égales, mais de nature contraire. Dans une des expériences, le fil aimanté avait 27 pouces de longueur sur 2 lignes de diamètre; à 6 pouces des extrémités la force magnétique était équivalente à une torsion de 6°, et croissait jusqu'à l'extrémité où elle était représentée par une torsion de 165°. La courbe *abcb'a'* (fig. 467) indique la distribution du magnétisme dans une aiguille; l'intensité magnétique de chaque point est représentée par l'ordonnée qui passe par ce point.

821. Pour les fils et les lames d'une longueur différente, dont les dimensions transversales sont égales, mais très-petites relativement à la longueur, et qui sont régulièrement aimantées, la courbe qui représente les intensités magnétiques est exactement la même, pourvu que la longueur surpasse 6 ou 8 pouces. Il résulte de là qu'au dessus de 6 ou 8 pouces tous les aimants prismatiques d'une petite section ont leurs pôles à la même distance des extrémités : car les pôles n'étant que les points d'application des résultantes totales, ces points sont placés de la même manière quand les composantes partielles suivent la même loi. Coulomb a fait voir que ces pôles se trouvent à 18 lignes des extrémités.

Pour les aimants prismatiques très-courts, les pôles sont à peu près au tiers de la demi-longueur, en partant des extrémités; ce dernier résultat est une limite dont les pôles s'approchent de plus en plus à mesure que la longueur de l'aimant diminue. D'après M. Becquerel, la distribution du magnétisme dans les fils d'acier très-fins suit les mêmes lois.

Quand l'aiguille n'est pas prismatique, les lois précédentes ne sont point applicables; dans les aiguilles en losange, les pôles se rapprochent du centre.

822. *Points conséquents.* Quand les aiguilles ou les barreaux ont une très-grande longueur, ils renferment quelquefois un certain nombre de pôles intermédiaires à ceux qui existent aux extrémités : ces pôles intermédiaires sont désignés sous le nom de *points conséquents.* D'après Coulomb, il s'en forme toujours dans les aiguilles d'acier trempé dont la longueur excède 30 fois le diamètre.

On peut facilement reconnaître leur présence et leur position en plongeant l'aiguille dans de la limaille de fer : elle se fixe sur tous les pôles. La figure 468 représente une aiguille renfermant un point conséquent; la figure 469 une aiguille qui en contient deux. Au dessous des aiguilles on a tracé la courbe qui représente la distribution du magnétisme. On peut aussi reconnaître la présence des points conséquents en plaçant le barreau verticalement et en approchant une aiguille d'épreuve que l'on fait monter parallèlement à elle-même, de manière à la présenter successivement en face de chaque point du barreau. Si le barreau n'a pas de points conséquents, on n'observe qu'une attraction et une répulsion; s'il a un point conséquent, on observe deux alternatives, etc. En parlant de l'aimantation, nous verrons la cause de la formation des points conséquents et les moyens de les éviter : car leur présence dans les aiguilles de boussoles diminue leur force directrice, et dans certaines circonstances peut les rendre complétement inexactes.

§ 5. *Théorie du magnétisme.*

823. Pour expliquer les phénomènes magnétiques, on admet l'existence de deux fluides impondérables, désignés sous les noms de *fluide austral* et de *fluide boréal,* dont les molécules similaires se repoussent, et celles de nature différente s'attirent. Ces deux fluides existent à l'état de combinaison dans tous les corps magnétiques, et sont séparés par une action magnétique étrangère; mais comme les

aimants ne perdent point de leur intensité magnétique en la développant dans d'autres corps, il s'ensuit que les fluides magnétiques ne sortent pas des corps; et comme des fragments quelconques d'un aimant sont des aimants complets, il est extrêmement probable qu'il en est de même de chaque molécule et, par conséquent, que dans l'aimantation la séparation des fluides a lieu seulement dans chaque molécule.

824. Sans établir aucune hypothèse sur la nature des fluides magnétiques, mais en partant de la loi de Coulomb et de la supposition que dans leur séparation les fluides ne parcourent qu'un espace infiniment petit, Poisson est parvenu à trouver les conditions d'équilibre des fluides magnétiques dans les aimants, et les formules qui expriment leur action sur un point extérieur. Dans quelques cas particuliers, où ces formules étaient intégrables, Poisson en a déduit des résultats qui ont été pleinement confirmés par l'expérience. Nous allons entrer à cet égard dans quelques détails. Poisson considère chaque point d'un corps magnétique à l'état naturel comme renfermant les deux fluides à l'état de combinaison, qui est maintenue par une force d'intensité variable, désignée sous le nom de *force coercitive*. Par l'action d'un aimant étranger, les deux fluides se séparent, s'éloignent à une distance très-petite, y restent par la force inconnue qui empêche les fluides magnétiques de sortir des corps dans lesquels ils ont été développés; mais si le corps est soustrait à l'influence qui a séparé les deux fluides, il rentre dans l'état primitif ou conserve celui qu'il a reçu, en totalité ou en partie, suivant que la force coercitive du corps sera nulle, ou sera plus ou moins grande. En un mot, on considère les aimants et les corps susceptibles de recevoir l'influence magnétique, comme formés d'un grand nombre de petits corps qui jouissent individuellement des mêmes propriétés que la masse dont ils font partie. Poisson appelle *éléments magnétiques* les espaces dans lesquels les fluides magnétiques s'etendent par leur séparation, et *lignes magnétiques* les lignes, droites ou courbes, qui sont formées par les lignes polaires des éléments magnétiques.

Lorsqu'un corps sans force coercitive est soumis à l'influence d'un centre magnétique extérieur ou intérieur, dans l'état d'équilibre, la résultante de toutes les actions attractives ou répulsives sur un élément doit être égale à zéro. Mais dans le cas où le corps a une force coercitive quelconque, la résultante doit seulement être plus petite que cette force, car autrement il se développerait un

nouveau magnétisme. Enfin, dans le cas où le corps serait aimanté à saturation, il faudrait, pour que l'équilibre existât, que la résultante totale, pour un point quelconque, fût égale à la force coercitive. De là le moyen de trouver les équations d'équilibre dans chaque cas particulier. Poisson a constaté que la résultante des actions de tous les éléments magnétiques d'un aimant était équivalente à l'action d'une couche magnétique très-mince qui recouvrirait la surface du corps, et qui serait formée des deux fluides, boréal et austral, qui en occuperaient des parties distinctes. En appliquant les formules générales au cas particulier d'une sphère de fer doux, aimantée par l'action du globe, on obtient un grand nombre de résultats qui ont été parfaitement confirmés par des expériences directes faites par M. Barlow.

Nous n'entrerons pas dans les détails de cette théorie; les calculs en sont trop élevés pour trouver place dans un traité élémentaire de physique; mais nous essayerons de faire concevoir le mode de distribution du magnétisme libre dans une aiguille, et, pour plus de simplicité, nous considérerons l'aiguille comme formée d'une seule file de molécules. Si ces éléments étaient sans action les uns sur les autres pour faire varier leur état magnétique, et si on supposait nuls les intervalles qui les séparent, tous les pôles élémentaires se neutraliseraient; il ne resterait que les pôles contraires des éléments extrêmes : alors l'aiguille ne serait aimantée qu'à ses extrémités. Mais il faut nécessairement admettre des intervalles entre les éléments magnétiques, et une influence mutuelle sur leur état final. Il doit en être des éléments magnétiques comme de petites aiguilles aimantées sous leur influence mutuelle (fig. 470) : elles prennent des états magnétiques qui ne sont pas les mêmes que si elles étaient isolées. Cela posé, considérons un élément magnétique à une certaine distance des extrémités du barreau. Soit n le nombre des éléments qui se trouvent du côté où sera, je suppose, le pôle boréal : il est évident que tous les pôles australs de ces éléments sont plus voisins de l'élément que nous considérons que les pôles boréals correspondants. Ainsi les premiers auront un excès d'action sur les derniers, et cet excès tendra évidemment à favoriser la décomposition du fluide magnétique dans l'élément; il en sera évidemment de même des molécules magnétiques qui se trouvent de l'autre côté; mais on trouve par le calcul que la somme de ces actions est la plus grande possible au centre, et qu'elle diminue du centre aux extrémités, d'abord très-lentement, et ensuite avec une

grande rapidité. Ainsi, l'intensité magnétique des éléments diminue du centre aux extrémités; et l'excès d'action de deux pôles élémentaires voisins augmente du centre aux extrémités, et par suite tout se passe comme si les deux fluides magnétiques étaient répartis chacun dans une des moitiés de l'aiguille, et en quantité croissante à partir du milieu.

Nous rapporterons ici une expérience due à M. Haldat (*A. C. et P.*, t. LXV), qui démontre avec la dernière évidence que la polarité des aimants résulte de la polarité de leurs molécules. Un cylindre de laiton mince de $0^m,012$ de diamètre, $0^m,015$ de hauteur, fermé par un bout, rempli de limaille de fer, fermé par un tampon de cuivre à vis, et aimanté à la manière ordinaire, a acquis des pôles sensiblement de même intensité qu'un cylindre de fer écroui de mêmes dimensions. La pression du tampon était sans influence. En agitant la limaille, la polarité a diminué et a fini par disparaître. En remplaçant une partie de la limaille par du sable uniformément disséminé dans la limaille, sa polarité a pu s'établir encore.

§ 6. *De l'aimantation.*

825. Nous avons déjà vu que les corps susceptibles de devenir magnétiques acquéraient cette propriété par le contact avec un aimant; mais ces corps peuvent encore devenir magnétiques dans un grand nombre d'autres circonstances, par les décharges électriques, par l'action de la terre, par des courants galvaniques. Nous ne parlerons ici que des procédés employés pour donner à des barreaux d'acier la plus forte puissance magnétique au moyen des aimants naturels ou artificiels, ainsi que de l'aimantation par l'action de la terre; quant à celle qui provient des décharges électriques et des courants galvaniques, il en sera question dans les chapitres suivants.

Les méthodes d'aimantation directes, jusqu'ici employées, sont au nombre de deux, qu'on désigne sous les noms de *simple touche* et de *double touche*.

826. Avant d'exposer ces différentes méthodes, nous devons dire ce qu'on doit entendre par aimantation à saturation. La quantité de fluide magnétique développée dans un barreau croît toujours avec la force des aimants qui agissent sur lui; mais la quantité de fluide libre qui y reste lorsqu'il est soustrait à l'influence des aimants, dépend de sa force coercitive, et cette quantité est suscep-

tible d'une limite qu'on nomme saturation. Une aiguille sursaturée ne perd pas cependant instantanément son excès de puissance; elle reste quelquefois plusieurs mois avant de revenir au point de saturation.

Pour reconnaître si une aiguille est aimantée à saturation, il faut l'aimanter de nouveau dans le même sens, avec des aimants plus forts : si elle acquiert une puissance magnétique plus grande que celle qu'elle avait d'abord, elle n'était point aimantée à saturation; mais si elle ne prend qu'un faible accroissement de magnétisme, et si elle le perd avec le temps, ce sera une preuve qu'elle avait d'abord été aimantée à saturation.

827. *Méthode de la simple touche.* Lorsqu'on met le pôle d'un aimant en contact avec l'extrémité d'un barreau d'acier AB (fig. 471), il se manifeste au point A un pôle contraire à celui de l'aimant, et si le barreau est très-petit et très-court, l'aimant étant très-puissant, l'extrémité B acquerra un pôle contraire à celui du point A. En effet, le barreau étant supposé très-court et l'aimant très-puissant, la décomposition du fluide magnétique aura lieu dans tous les éléments du barreau d'acier, et, par l'action réciproque de tous les pôles élémentaires, il se développera des pôles opposés aux extrémités. Dans les circonstances dont nous venons de parler, le barreau sera fortement aimanté, et il le sera à saturation, si, par l'action de l'aimant sur l'élément magnétique du barreau le plus éloigné, il se fait une décomposition plus grande que celle qui peut être maintenue par la force coercitive. Mais si la décomposition sur l'élément le plus éloigné est plus petite que celle qui peut subsister, l'aiguille ne sera pas aimantée à saturation, et il est facile de voir que la ligne neutre se rapprochera du point qui a été en contact avec l'aimant, et que les deux pôles n'auront pas des positions symétriques. Si le barreau a une certaine longueur, et surtout s'il possède une grande force coercitive, l'influence directe du pôle de l'aimant ne se manifestera que sur une certaine partie AC (fig. 472), terminée au point où son action sera égale à la force coercitive; au delà le barreau ne présentera aucun indice de magnétisme.

Si l'on touchait avec un des pôles de l'aimant un point quelconque du barreau d'acier, on y développerait un pôle, et de chaque côté, à une distance plus ou moins considérable, des pôles de nature contraire : ainsi on pourra produire, par un simple contact, un point conséquent en un point quelconque d'un barreau. Dans les bar-

reaux qui renferment des points conséquents, les fluides magnétiques sont disposés de la même manière que dans des barreaux ayant pour longueur les distances des points conséquents et qui seraient réunis par les pôles du même nom.

828. Une méthode, qui paraît préférable à la première, consiste à faire glisser le pôle d'un aimant sur un barreau d'acier; dans chacune de ses positions, il attire le magnétisme de nom contraire et repousse l'autre : par conséquent, dans son mouvement il fait successivement passer chaque point du barreau par deux états magnétiques différents, et lorsqu'il a quitté le barreau, la dernière extrémité touchée possède un pôle de nom contraire à celui de l'aimant, et la première un pôle de même nom.

Pour rendre compte de l'effet produit par cette méthode, considérons d'abord le barreau lorsqu'il touche l'aimant par une de ses extrémités (fig. 473) : le barreau acquiert d'abord deux pôles *a* et *b* comme par la méthode du simple contact; mais à mesure que l'aimant glisse sur le barreau, il change la nature de l'aimantation qu'il avait donnée d'abord. En effet, considérons le barreau lorsqu'il est touché au point *p* par l'aimant (fig. 474) : au point *p* se trouve un point conséquent; la partie *pr* est chargée de fluide austral, je suppose, ainsi que la partie *ps;* et en *mr* ainsi qu'en *sn* se trouve le fluide boréal; mais à mesure que le point *p* avance vers *n*, l'état magnétique de la partie *pr* change, le point *r* avance, le point *s* recule, et quand le barreau est arrivé à l'extrémité *n*, le point *r* est au milieu du barreau, et les extrémités *m* et *n* possèdent des pôles contraires. On voit d'après cela que le développement de magnétisme dans chaque élément, occasionné par l'influence à distance de l'aimant et par le contact, change de signe, et varie continuellement d'intensité pendant le mouvement, d'où il suit que des frictions réitérées n'augmenteraient pas l'aimantation si elles avaient lieu sur les mêmes files de molécules, parce que chacune détruirait l'état magnétique produit par la précédente. Il résulte aussi de là que, si, après avoir aimanté un barreau avec un aimant puissant, on passe sur ce barreau un aimant plus faible, ce dernier, au lieu d'augmenter l'état magnétique du barreau, le diminue à chaque friction, et finirait par le réduire à ce qu'il aurait été si le barreau n'eût été aimanté que par lui : car ce dernier tend d'abord à détruire, par le contact avec chaque élément, l'état magnétique qui avait été produit par le premier. Ainsi, la méthode en question est peu supérieure à celle dont nous avons parlé d'a-

bord, et qui consiste dans le simple contact d'une des extrémités du barreau avec un des pôles de l'aimant, du moins quand les barreaux sont très-courts.

Cette méthode d'aimantation est bonne cependant pour aimanter des aiguilles courtes et d'une petite dimension; mais elle a l'inconvénient de donner souvent des points conséquents. Il suffit même, pour en produire à volonté, de laisser plus longtemps sur un point le pôle de l'aimant; elle ne produit d'ailleurs jamais une aimantation régulière.

829. *Méthode de la double touche.* Cette méthode produit un développement de magnétisme bien supérieur à celui que l'on obtient par la simple touche. Elle consiste à frotter sous une grande pression le long d'un barreau les deux pôles opposés de deux barreaux aimantés, couchés (fig. 475), perpendiculaires (fig. 475 A), ou inclinés (fig. 476 et 477), en les faisant mouvoir parallèlement ou en sens contraire, et en armant les extrémités du barreau que l'on veut aimanter de masses de fer doux ou de forts aimants.

830. Knight, en 1745, eut le premier l'idée d'employer deux aimants. Son procédé consiste (fig. 475) à placer bout à bout les pôles opposés de deux forts barreaux aimantés, et au-dessus le barreau que l'on doit aimanter, de manière que son milieu corresponde à leur ligne de jonction, et à séparer les aimants en les faisant mouvoir chacun de son côté : on obtient ainsi un effet beaucoup plus grand que par la simple touche. On en concevra facilement la raison, en remarquant que par cette méthode, dans toutes les positions des deux aimants mobiles, la nature du magnétisme développé dans les éléments du barreau qui les séparent reste la même, et que leurs actions concourent avec celle du magnétisme déjà développé dans ces éléments pour produire l'état magnétique final. Par cette méthode on peut aimanter à saturation des barreaux courts et peu épais; mais il est impossible d'aimanter à saturation un barreau un peu long.

831. Duhamel introduisit dans cette méthode un perfectionnement important. Il plaçait le barreau à aimanter entre deux barres de fer doux (fig. 476); les frictions se faisaient par des barreaux aimantés, comme dans la méthode de Knight, mais ils étaient inclinés de 25 à 30 degrés. Cette méthode renferme deux circonstances importantes : 1° l'inclinaison des aimants, qui, en rapprochant leurs centres d'action du barreau, augmente leur effet; 2° l'emploi des armatures de fer doux. Pour concevoir l'effet produit

par ces armatures, il faut remarquer qu'aussitôt que les barreaux ont acquis un certain degré de magnétisme ils aimantent les barreaux de fer; le magnétisme développé dans ceux-ci dissimule et fixe une partie du magnétisme polaire des barreaux, et donne ainsi aux aimants plus de facilité pour opérer une nouvelle décomposition de fluide par une nouvelle friction.

La méthode de Knight ou de Duhamel est la meilleure pour aimanter de la manière la plus complète et la plus régulière les aiguilles de boussole et les lames dont l'épaisseur ne dépasse pas 4 à 5 millimètres.

832. Mitchell employa une autre méthode. Elle consiste à mettre plusieurs barreaux d'acier en contact, à la suite les uns des autres, et à frotter sur leur surface, par les pôles contraires et perpendiculairement, deux faisceaux de barreaux aimantés, fixés à une distance constante (fig. 475 A). Les barreaux intermédiaires se trouvent fortement aimantés.

Il est facile de voir que, dans cette méthode, les barreaux, placés les uns à la suite des autres, se servent mutuellement d'armature, et agissent comme les barres de fer doux dans la méthode de Duhamel : c'est pour cette raison que les barreaux intermédiaires prennent seuls un grand développement de magnétisme. Quant à l'influence de la position des deux aimants fixés entre eux, on peut s'en rendre compte aisément : en effet, la décomposition du fluide magnétique dans les éléments du barreau qui sont placés entre les deux aimants est effectuée par le concours des actions des deux barreaux, et cet état magnétique tend à changer quand les aimants ont dépassé ces éléments; mais alors le nouvel état magnétique ne tend à s'établir que par la différence des actions des deux barreaux; par conséquent, l'état magnétique que les éléments ont reçu en passant entre les deux barreaux subsiste encore en grande partie après la course des aimants.

833. Æpinus fit à cette dernière méthode une amélioration importante. Il plaça de forts aimants à l'extrémité des barreaux d'acier, et il inclina les aimants mobiles sur la surface des barreaux d'acier, comme l'avait fait Duhamel; mais il les fixa entre eux comme dans la méthode de Mitchell (fig. 477). Par cette inclinaison, la résultante des actions des aimants sur chaque molécule *m* devenait plus oblique sur la surface du barreau, et, par conséquent, la composante horizontale devenait plus considérable; mais comme, à mesure que l'inclinaison augmente, les pôles des aimants s'éloi-

gnent, l'inclinaison, pour produire le maximum d'effet, devait atteindre une certaine limite que l'expérience seule devait faire connaître. Æpinus trouva que cette limite était de 15° à 20°.

La méthode d'Æpinus est celle qui donne le plus grand développement magnétique; mais elle a l'inconvénient de produire souvent des points conséquents, et toujours une aimantation irrégulière. D'après Coulomb, la ligne neutre est rapprochée de quelques millimètres de la partie qui a été aimantée la dernière; celle de Duhamel est exempte de cet inconvénient. La méthode de Duhamel, en remplaçant les barreaux de fer doux par de forts aimants, est la meilleure que l'on puisse employer pour des aiguilles de boussoles. On place l'aiguille à aimanter de manière qu'elle empiète de 15 à 18 lignes sur les aimants, ou seulement de 7 à 8 lignes, si elle n'a que 3 ou 4 pouces de longueur; quand l'aiguille est trop mince, on la place sur une pièce de bois où l'on peut la fixer. La méthode d'Æpinus doit être préférée pour aimanter de forts barreaux.

834. *Influence du choc.* Les aimants perdent toujours une partie de leur magnétisme quand ils sont frappés, et surtout quand ils le sont dans une position verticale, et que le pôle boréal est en haut.

835. *Influence de la température sur l'état magnétique des aimants.* Nous avons déjà dit que par la chaleur rouge les aimants perdaient complétement leur force magnétique; mais cette perte a lieu progressivement, et, un fait très-remarquable observé par Kupffer, c'est que l'influence de la température n'est pas instantanée, c'est-à-dire qu'il faut un certain temps pour que toute la recomposition du fluide qui peut s'effectuer à une certaine température s'accomplisse. Ainsi, par exemple, une aiguille qui a été plongée à plusieurs reprises dans de l'eau bouillante, chaque fois pendant 10 minutes, n'a conservé un état magnétique permanent qu'après la sixième immersion.

Un barreau aimanté soumis seulement aux veriations de température de l'air éprouve des changements dans son état magnétique : il diminue avec l'élévation de température, et augmente avec son abaissement. Lorsque les variations sont très-grandes, l'aiguille par le refroidissement ne reprend pas le même état magnétique : par exemple, une aiguille aimantée a fait 10 oscillations en 429″ à 13°, 10 oscillations en 476″ à 80°, et 10 oscillations en 463″ à 13° après le refroidissement (Kupffer). Lorsqu'on chauffe seulement une partie du barreau, le point d'indifférence s'éloigne

de la partie chauffée; dans le cas d'une barre de fer doux aimantée par l'action de la terre, le point d'indifférence se rapproche de la partie chauffée, probablement parce que la force coercitive diminue, et que l'aimantation augmente.

336. *Magnétisme relatif du fer, de l'acier et de la fonte.* D'après M. Barlow, en représentant par 100 l'action magnétique à froid du fer doux, celle de l'acier non trempé est comprise entre 66 et 74; celle de la fonte de fer est 48. Au rouge blanc, l'action magnétique de la fonte est plus grande que celle du fer et de l'acier; à cette température, celle du fer est nulle; au rouge de sang, celle du fer est considérable; à une température comprise entre le rouge de sang et le rouge blanc, l'action magnétique du fer et de la fonte sur une aiguille aimantée est opposée à celle qui existe à froid. Il est probable que cette anomalie singulière provient de la formation des points conséquents par l'influence de la terre. Ces expériences ont été faites en plaçant dans la direction de l'aiguille d'inclinaison et successivement dans le même lieu des barres egales, et à une petite distance une aiguille aimantée; ces expériences auraient besoin d'être répétées.

337. *Influence de la trempe sur le pouvoir coercitif.* Si on prend un barreau d'acier dans un état parfait de recuit, c'est-à-dire qui a été chauffé au rouge blanc et refroidi à l'air, qu'on le trempe successivement à différentes températures, et qu'après chaque trempe on l'aimante à saturation, on trouve que le développement de magnétisme qu'il peut acquérir et conserver croît avec la température de la trempe, du moins quand cette température a été assez élevée pour modifier l'état physique du barreau. Nous rapporterons une série d'expériences faites par Coulomb.

Température de la trempe.	Durées de 10 oscillations après l'aimantation à saturation.
Jusqu'à 700°	93"
780	78
860	64
950	63

Jusqu'à 700° la trempe n'a eu aucune influence, parce que c'est à cette température que l'influence de la trempe sur l'élasticité de l'acier commence à se manifester; et l'on voit que la force coercitive a plus que doublé de 700° à 950°, puisque les intensités magnétiques étaient comme $(93)^2 : (63)^2 :: 8649 : 3969$.

338. *Influence du recuit sur la force coercitive.* Le recuit, di-

minuant l'effet de la trempe, doit produire un effet analogue à celui qui résulterait d'une trempe à une plus basse température : c'est ce qui existe en effet. Nous avons déjà dit que le recuit s'estime ordinairement par la teinte que prend l'acier par l'action de la chaleur; il passe d'abord à une nuance jaune clair, puis successivement à l'orangé, à l'orangé foncé, au rouge-violet, au bleu vif, et à une couleur verdâtre qu'on désigne sous le nom de vert d'eau. La première nuance paraît répondre à 200°, la dernière à 410°.

D'après les expériences de Coulomb, un barreau trempé au rouge cerise clair, étant recuit à différentes températures, a donné les résultats suivants :

Température du recuit.	Temps de 10 oscillations après une nouvelle aimantation.
12°	63″
214	64,5
410 couleur d'eau.	70
900 cerise clair.	93

Ainsi les barreaux recuits au bleu conservent assez de pouvoir coercitif pour prendre une grande intensité magnétique, et comme l'acier trempé très-dur est très-cassant, et qu'il acquiert alors facilement des points conséquents, il y a toujours de l'avantage à recuire au bleu les aiguilles des boussoles.

D'après Coulomb les aiguilles dont la longueur excède trente fois le diamètre présentent des résultats opposés : le recuit augmente la puissance magnétique, et d'autant plus qu'il a lieu à une plus haute température, du moins jusqu'à une certaine limite. Cette anomalie provient de ce qu'il se forme toujours dans les aiguilles longues des pôles intermédiaires qui se rapprochent à mesure que le recuit augmente, et qui finissent par se confondre.

839. *Formes et dimensions des aiguilles de boussole.* Il résulte des expériences de Coulomb, comme nous l'avons déjà dit, que les aiguilles en losange, à poids égal, ont une plus grande force directrice que sous toute autre forme : ainsi la forme en losange doit être préférée. L'épaisseur doit être la plus petite possible, attendu que, la force directrice variant dans un plus petit rapport que l'épaisseur, et la résistance de la pointe de suspension augmentant au moins dans le rapport des poids, l'amplitude de l'angle d'arrêt augmente avec l'épaisseur. Quant à l'influence de la longueur, elle est presque nulle, car le frottement dans la chape et la force directrice varient sensiblement comme les longueurs des aiguilles, les sections restant les mêmes.

840. *Faisceaux magnétiques.* On appelle faisceaux magnétiques des barreaux aimantés réunis parallèlement et par les pôles de même nom. La fig. 479 représente un faisceau en fer à cheval; les lames, après avoir été trempées et aimantées, sont appliquées les unes sur les autres, et maintenues par des bandes de métal. La fig. 478 représente un faisceau construit d'après la méthode de Coulomb: il est formé de trois couches, renfermant chacune cinq lames, assujetties dans des pièces de fer qui leur servent d'armatures. Lorsqu'on aimante séparément des barreaux et qu'on les réunit pour en former un faisceau, on n'obtient point un effet égal à la somme des effets que produiraient séparément les barreaux, parce que les pôles voisins exercent les uns sur les autres une action réciproque qui les affaiblit. Coulomb, pour étudier les phénomènes qui se développent dans les faisceaux, prit seize lames d'acier découpées dans la même feuille, ayant la forme d'un parallélogramme rectangulaire; elles avaient 6 pouces de longueur, et 9 lignes 1/2 de largeur. Après les avoir aimantées séparément à saturation, il en forma différents faisceaux, en les posant à plat les unes sur les autres, et les liant par des fils de soie; puis il les suspendit et observa les torsions nécessaires pour les retenir à 30° du méridien magnétique. Il obtint les résultats suivants :

Nombre des lames assemblées.	Torsions observées.
1	82°
2	125
4	150
6	172
8	182
12	205
16	229

On voit, d'après ce tableau, que la torsion est loin de croître proportionnellement au nombre des lames.

Coulomb, ayant isolé les lames de chaque faisceau, essaya séparément la force directrice de chacune d'elles, en les amenant toujours à 30° du méridien. Il obtint les résultats suivants pour les 8 lames supérieures d'un faisceau de 16 lames :

Rang des lames.	Torsions.	Rang des lames.	Torsions.
1re	48°	5e	34°
2e	36	6e	38
3e	35	7e	35
4e	33	8e	31

Ainsi, les lames centrales avaient éprouvé une diminution de magnétisme.

Nobili, qui a répété ces expériences, a trouvé que les aiguilles centrales prenaient des pôles contraires. On voit, d'après cela, que quand on forme des faisceaux, il est très-avantageux de les disposer en retraite, à partir du centre, de manière à former aux extrémités des angles saillants ou rentrants, car alors les actions des barreaux tendent à augmenter leur puissance magnétique. Il résulte aussi de ces expériences que la partie centrale d'un barreau tend plutôt à diminuer l'effet qu'à l'augmenter; c'est d'ailleurs ce qu'une expérience directe de Nobili démontre avec la dernière évidence. Deux cylindres d'acier de même diamètre et de même longueur, mais dont l'un avait été foré, de manière que leurs poids étaient 28 grammes pour le premier et 16 grammes pour le second, ayant été trempés de la même manière et aimantés à saturation, produisirent sur une aiguille placée de la même manière par rapport à chacun d'eux, le premier une déviation de 9°,5, et le second une déviation de 19°. M. Haldat a aussi constaté que l'action des aimants réside principalement à leur surface, car un tube de fer aimanté par un courant [1103] a acquis la même puissance lorsqu'il était vide, ou rempli par un cylindre de fer ou par de la limaille fortement tassée (*A. C. et P.*, t. XI).

M. Scoresby a observé que des lames minces d'acier trempé, aimantées et superposées, mais séparées par des lames minces de bois, forment un système plus énergique et plus persistant qu'une masse unique d'acier de mêmes dimensions. L'action du système est plus petite que la somme des actions des éléments, et l'accroissement d'effet résultant de l'addition d'une lame diminue à mesure que le nombre des lames est plus considérable (*A. C. et P.*, t. LXIX). Un barreau, composé de 72 lames d'acier trempé dur, de 15 pouces de longueur, 1 pouce 1/2 de largeur, et du poids de 1075 grains, soutenait une clef de fer de 129 grains à travers une planche de 6 dixièmes de pouce d'épaisseur.

Avec 196 lames d'acier trempé très-dur, le barreau a eu 6 fois plus d'effet que quand les barreaux étaient trempés à la manière ordinaire (*A. C. et P.*, t. LXIX).

Coulomb a reconnu que des barreaux semblables, formés d'aiguilles de fer écroui, ont des forces directrices proportionnelles aux cubes des côtés homologues; et que pour les fils circulaires aimantés à saturation par la méthode de la double touche, les

quantités de magnétisme libre développées aux extrémités sont proportionnelles aux rayons des fils. D'après M. Quetelet, dans les aimants semblables, les forces directrices sont proportionnelles aux carrés des côtés homologues.

841. *Des armatures.* Lorsque le pôle A d'un aimant touche l'extrémité *a* d'un barreau de fer doux, il y développe un magnétisme contraire, et ce magnétisme réagit sur l'aimant et tend à y exciter une nouvelle décomposition de fluide. Cette augmentation produit dans le barreau une décomposition nouvelle qui réagit encore sur le pôle A, de sorte que l'un et l'autre, par cette mutuelle réaction, acquièrent un magnétisme plus intense.

C'est ce que l'on peut facilement vérifier en suspendant à un aimant en fer à cheval (fig. 479) un barreau de fer et une coupe de balance : on trouve que tous les jours le poids que l'aimant peut soutenir augmente ; mais quand on détache le fer, si l'aimant avait d'abord été aimanté à saturation, il reprend son magnétisme primitif ; dans le cas contraire, il conserve seulement une partie de ce qu'il avait acquis.

Les barres de fer doux dont on garnit les aimants portent le nom d'*armatures*. Les barreaux aimantés sont ordinairement placés parallèlement dans une boîte (fig. 480), de manière que les pôles contraires se correspondent aux deux extrémités, et on met transversalement des prismes quadrangulaires de fer doux, qui complètent le parallélogramme : chacune de ces pièces de fer devient un aimant qui réagit sur les barreaux pour y fixer les fluides décomposés.

En outre, les armatures sont utiles, parce que, dans certaines positions des aimants, le magnétisme terrestre tend à recomposer les fluides magnétiques libres. Les aiguilles libres se trouvent toujours placées, en vertu de leur force directrice, de manière que l'action de la terre agit pour y développer une plus grande énergie : ainsi l'action de la terre leur tient lieu d'armatures.

On met aussi des armatures aux aimants naturels, non-seulement pour augmenter la force magnétique des pôles, mais encore pour donner au magnétisme de la masse une meilleure direction. Ces armatures sont des plaques de fer doux que l'on applique contre les faces des pôles préalablement polies, et que l'on maintient par des cercles de cuivre (fig. 481).

842. *Aimantation partielle des lames d'acier.* M. Haldat a observé qu'on pouvait aimanter partiellement des plaques d'acier,

suivant des contours quelconques, et produire alors, en y projetant de la limaille de fer, des figures analogues à celles que l'on forme sur des gâteaux de résine en y promenant le bouton d'une bouteille de Leyde chargée [924]. M. Haldat emploie des plaques de tôle d'acier, propres à la fabrication des cuirasses, de 2 à 3 décimètres carrés et de 1 à 3 millimètres d'épaisseur; elles doivent être décapées et adoucies à la lime ou au grès fin. Pour les aimanter partiellement, on se sert d'un fort barreau aimanté, dont une des extrémités est arrondie; on promène cette extrémité sur la plaque en suivant la ligne que l'on veut aimanter; elle est rendue visible en répandant sur la lame de la limaille de fer. On peut ainsi écrire des mots; mais les lettres ne doivent pas avoir moins de 4 à 5 centimètres de hauteur pour être bien distinctes. Les traces de l'aimant restent vides et la limaille de fer se range de chaque côté; le magnétisme ainsi développé reste souvent encore sensible après six mois. Pour faire disparaître ces traces immédiatement, il suffit de chauffer la plaque sur des charbons jusqu'à la température à laquelle l'acier prend la teinte jaune paille. Pour éviter le polissage de la pièce après le recuit, M. Haldat emploie des plaques étamées et les chauffe jusqu'à la fusion de l'étain; mais comme l'enduit métallique s'oxyde, on lui rend son éclat en le frottant avec une poignée d'étoupe imbibée d'huile mêlée de sel ammoniac, après avoir répandu sur la surface de la lame une petite quantité de limaille d'étain. On peut aussi faire disparaître entièrement les traces de magnétisme en excitant dans la lame de violentes vibrations : pour cela, on la place sur un madrier, et on la frappe à coups précipités avec un petit maillet de bois; après trois ou quatre minutes, tout indice de magnétisme a disparu. Les vibrations excitées dans la plaque de manière à la rendre seulement sonore sont insuffisantes pour produire l'effet dont il est question.

M. Haldat a encore observé un phénomène très-remarquable, relatif à l'influence du frottement sur le développement du magnétisme. Si on prend des fils de fer doux non recuits, d'un décimètre de longueur et d'un millimètre de diamètre, et si on les place entre les pôles contraires de deux aimants assez distants pour qu'ils ne décomposent pas le fluide magnétique des fils, ces derniers s'aimantent quand on les frotte vivement et longitudinalement avec un corps dur, tel que du laiton, du cuivre, du zinc, du verre et même du bois. Ainsi l'ébranlement des molécules d'un corps facilite son aimantation. On conçoit, d'après cela, pourquoi il est nécessaire,

quand on veut développer une grande puissance magnétique dans de gros barreaux, de faire les frictions avec une grande pression.

843. *Aimantation par l'action de la terre.* La terre, comme nous l'avons vu, exerce une action continuelle sur les aimants et sur tous les corps magnétiques. Cette action tend à aimanter ces derniers; mais, à cause de son peu d'énergie, elle ne produit cet effet que sur les corps qui n'ont qu'une petite force coercitive. Cette aimantation est évidemment analogue à celle qui a lieu par l'influence d'un aimant à distance. L'action magnétique de la terre est surtout remarquable sur le fer doux. Si on prend une barre de fer de 1 mètre de longueur, placée dans la direction du magnétisme terrestre, ou seulement verticalement, elle prend un pôle austral à la partie supérieure et un pôle boréal à la partie inférieure; si alors on fait tourner la barre autour de son milieu, l'intensité des pôles s'affaiblit à mesure que la barre se rapproche d'une position perpendiculaire à sa première direction : alors tout indice de polarité disparaît; et si on continue le mouvement, les pôles reparaissent de nouveau, mais en sens contraire, de sorte que le pôle austral est toujours sur l'extrémité supérieure de la barre.

D'après M. Barlow, les boulets et les bombes sont aimantés par le magnétisme terrestre : les deux pôles sont aux extrémités du diamètre parallèle à la direction de l'aiguille d'inclinaison; sur tous les points des diamètres perpendiculaires l'action magnétique est nulle, et l'action croît de cet équateur aux pôles. Les sphères pleines et creuses de même diamètre extérieur agissent de la même manière, pourvu que l'épaisseur excède 1/30 de pouce. Enfin, pour une même position de la boussole, les tangentes des déviations sont proportionnelles aux cubes des diamètres ou aux puissances 3/2 des surfaces, quelles que soient les épaisseurs des globes.

On concevra facilement, d'après cette expérience, que tous les corps magnétiques du globe deviennent, sous l'influence magnétique de la terre, de véritables aimants, dont les pôles changent avec leur position; mais si, par une circonstance quelconque, les corps ainsi magnétisés acquièrent une force coercitive, leur polarité subsiste, malgré les changements de position; et, pour que les corps acquièrent une force coercitive, il suffit qu'ils éprouvent une action mécanique quelconque, une percussion, une vibration, une torsion, qu'ils soient soumis à l'action de la lime, ou qu'ils s'oxydent. C'est ce que l'on peut facilement reconnaître par les ex-

périences suivantes. Lorsqu'une barre de fer doux, placée verticalement, est aimantée par l'action de la terre, si on la frappe avec un marteau à l'une de ses extrémités, les pôles deviennent fixes et ne changent plus avec la position de la barre; mais si l'on retourne la barre et qu'on la frappe de nouveau, on parvient à l'aimanter en sens contraire. Cependant la force coercitive ainsi imprimée à la barre n'est pas permanente ; car, après quelques jours, et souvent même après quelques heures, la polarité magnétique fixe a disparu. On peut produire les mêmes phénomènes sur des fils de fer que l'on tord dans une position verticale. Dans les ateliers où l'on travaille le fer, presque tous les outils sont des aimants. Quant à l'influence de l'oxydation, on a remarqué depuis longtemps que toutes les barres de fer qui sont exposées à l'air dans une position verticale, et qui sont oxydées, sont de véritables aimants. C'est Jules César, chirurgien de Rimini, qui fit le premier cette observation, en 1590. En 1630, elle fut confirmée par Gassendi, qui reconnut que la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix, qui était tombée de vétusté, et dont le pied était entièrement oxydé, possédait toutes les propriétés d'un aimant. On peut également aimanter des barres d'acier par l'influence de la terre, en les maintenant dans une position verticale et les frappant avec un marteau de haut en bas; on obtient beaucoup plus d'effet en les posant, par la partie inférieure, sur des barreaux plus grands de fer ou d'acier; on peut même obtenir ainsi une aimantation assez puissante pour que les barreaux, frictionnés ensuite entre eux par la méthode de la double touche, finissent par être aimantés à saturation : c'est un résultat auquel M. Scoresby est parvenu. Il est très-probable que, dans les expériences sur le fer doux rapportées précédemment, l'ébranlement des molécules facilite le développement des pôles, comme dans l'acier : car le fer doux n'est jamais complétement dépourvu de force coercitive. C'est ce qu'il est facile de reconnaître en soumettant à l'action d'un aimant un morceau de fer récemment recuit, afin de faire disparaître tout écrouissage : le morceau de fer conserve toujours des traces de polarité.

§ 7. *Action des aimants sur tous les corps.*

844. En 1812, Coulomb fit connaître à l'Institut une série d'expériences relatives à l'influence des aimants sur les corps non magnétiques. L'appareil qu'il employait est représenté dans la

figure 482. Une aiguille de 6 à 8 millimètres de longueur, formée d'or, d'argent, de verre, de bois, de différentes substances organiques ou inorganiques, était suspendue par un fil de cocon sous une cloche de verre; les pôles contraires de deux forts aimants pouvaient être approchés à une petite distance des extrémités de l'aiguille. Coulomb compta le nombre d'oscillations que les aiguilles exécutaient dans un temps donné, hors de l'influence et sous l'influence des aimants, et toujours il reconnut un accroissement de vitesse dans cette dernière circonstance : des barres non aimantées ne produisaient point cet effet. Ces phénomènes ne pouvaient s'expliquer qu'en admettant que tous les corps sont magnétiques, ou que toutes les substances renferment du fer, du nickel ou du cobalt; et pour que cette dernière hypothèse fût admissible, il faudrait que des quantités de ces métaux assez petites pour échapper aux analyses, fussent suffisantes pour produire les phénomènes dont il s'agit. Pour mesurer l'influence des petites quantités de fer renfermées dans les corps, Coulomb fit des mélanges artificiels et des alliages de fer en toutes proportions; et, en comparant leurs effets, il fut conduit à cette conclusion que, si les phénomènes dont il est question sont réellement dus à la présence des métaux magnétiques, ces métaux sont, dans les corps soumis à l'expérience, en quantités si petites que leur présence ne peut pas être mise en évidence par les réactions chimiques. Coulomb a aussi reconnu que la plupart des matières végétales et animales éprouvaient plus d'action magnétique que les métaux purifiés par les méthodes ordinaires. D'après les expériences de M. Becquerel, dans les corps faiblement magnétiques, comme les peroxydes de fer, le bois, la gomme laque, et d'une forme prismatique, la distribution du magnétisme ne se fait pas toujours dans la direction de l'axe.

845. Ces expériences peuvent servir à déterminer les quantités de fer qui se trouvent dans différentes substances. M. Biot en a fait une application remarquable, que nous allons rapporter. En faisant osciller deux petits faisceaux de lames de mica de différentes espèces, en présence de deux puissants aimants, dans le même temps l'un fit 12 oscillations, et l'autre 7 : les forces magnétiques étaient alors entre elles comme les nombres 144 et 49, et l'analyse chimique démontra ensuite que dans ces deux variétés de mica le fer se trouvait dans le rapport de ces deux nombres.

846. Lebaillif, au moyen d'un appareil d'une grande sensibilité, a reconnu depuis que presque toutes les substances agissent

sur l'aiguille aimantée. Il a aussi constaté ce fait remarquable, que le bismuth et l'antimoine exercent toujours une action répulsive sur l'aiguille aimantée.

L'appareil de Lebaillif, qu'il désigne sous le nom de *sidéroscope*, est représenté fig. 483; il se compose d'une paille de 12 à 15 pouces de longueur, dans laquelle on place trois fines aiguilles à coudre, aimantées à saturation; l'aiguille *ab* est placée dans la paille, de manière que son axe soit dans le prolongement de celui de la paille; les deux autres *a'b'* et *a''b''* traversent la paille perpendiculairement: elles sont disposées de manière que leurs pôles contraires se correspondent. La paille est supportée horizontalement par un petit étrier de papier qui est fixé à l'extrémité d'un fil de cocon (fig. 484). La partie *mn* n'a point de force directrice : on pourrait, par conséquent, remplacer les deux aiguilles par un petit contre-poids; mais la partie *m'n'* a une force directrice qui dépend de l'intensité magnétique de l'aiguille et du rapport des distances des deux pôles de l'aiguille *ab* à l'axe de rotation; elle est évidemment d'autant plus faible que l'aiguille est plus petite relativement à la longueur de la paille. Au-dessous de l'aiguille *ab* se trouve un arc de cercle divisé, et tout l'appareil est environné par une cage de verre pour soustraire les mouvements de l'aiguille à l'influence de l'air. La cage est percée en avant d'une ouverture circulaire, destinée à l'introduction des corps à l'action desquels on veut soumettre l'aiguille.

Cependant, tous les faits relatifs aux actions exercées par les corps sur les aimants ne sont pas encore constatés par des expériences assez multipliées; ces actions sont si faibles qu'il faut des précautions extrêmement nombreuses et très-délicates pour écarter les causes étrangères qui pourraient les produire ou les altérer.

§ 8. *Effets magnétiques des corps en mouvement.*

847. En 1822, M. Arago découvrit ce fait important : quand une aiguille aimantée oscille très-près d'une plaque solide ou d'une masse liquide placée au-dessous d'elle, elle éprouve une sorte de résistance, indépendante de celle de l'air, qui anéantit bientôt les oscillations sans influer sensiblement sur leur durée, et d'autant plus rapidement, pour le même corps, que sa distance à l'aiguille est plus petite. Par exemple, si la plaque est en cuivre et si elle est suffisamment voisine de l'aiguille, la diminution successive des amplitudes peut être telle que l'aiguille ne fasse que 3 ou 4 os-

cillations d'une étendue sensible avant de revenir au repos, tandis que l'on en pourrait compter 3 ou 4 cents, s'il n'y avait d'autre résistance que celle de l'air. M. Arago a reconnu le même genre d'influence, mais à des degrés différents, dans les autres métaux, le verre, l'eau, la glace, etc.

848. L'influence des différents corps sur l'amplitude des oscillations d'une aiguille aimantée a été étudiée par MM. Arago, Nobili et Bacelli, Seebeck et Baumgaertner. Nous rapporterons seulement ici les resultats obtenus par M. Seebeck. L'aiguille aimantée dont ce physicien s'est servi avait 2 pouces 1/8 de longueur; elle était placée à 3 lignes de distance des plaques. Il a observé le nombre des oscillations qui devaient s'exécuter pour que l'amplitude fût réduite de 45° à 10°. Le tableau suivant présente les résultats de ces expériences.

Nombre des oscillations.	Épaisseur des plaques.	Substances.
116	2,0 lignes.	Marbre.
112	2,0	Mercure.
106	2,0	Bismuth.
94	0,4	Platine.
90	2,0	Antimoine.
89	0,75	Plomb.
89	0,2	Or.
71	0,5	Zinc.
68	1,0	Étain.
62	2,0	Laiton.
62	0,3	Cuivre.
55	0,3	Argent.
6	0,4	Fer.

M. Seebeck a remarqué qu'en alliant des substances magnétiques à d'autres qui ne le sont pas, on peut former des composés qui n'exercent aucune action sur l'aiguille aimantée : tels sont, par exemple, l'alliage d'une partie de fer et de quatre d'antimoine, et celui d'une partie de nickel avec deux parties de cuivre.

849. Depuis, M. Arago a fait des expériences en sens contraire : il a soumis l'aiguille en repos à l'action de diverses plaques en mouvement. Il en est résulté des phénomènes fort remarquables, que nous décrirons après avoir fait connaître l'appareil employé par ce savant physicien.

Cet appareil est représenté en coupe (fig. 485); *ab* est un plateau circulaire de cuivre rouge ou de toute autre substance, fixé par son centre à la tige verticale *xy*, à laquelle on donne un mouve-

ment rapide de rotation au moyen d'une manivelle et de deux roues dentées; *cd* est une ouverture circulaire faite dans le plateau MN, et fermée inférieurement par une feuille de papier collée sur les bords; ABCD est une cloche de verre, dont la tubulure est garnie d'une douille terminée par un petit treuil, autour duquel s'enroule un fil de soie *mn*, qui supporte l'aiguille aimantée.

Dès que le mouvement du plateau *ab* commence, l'aiguille est déviée dans le sens de la rotation. Si la vitesse de la plaque n'est pas trop considérable, l'aiguille parvient, après un temps très-court, à une position stationnaire, dans laquelle l'action de la plaque fait équilibre à l'action de la terre, qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique. L'angle dont elle s'en écarte dans cette position, dépend de la distance de l'aiguille au plateau, de la vitesse de rotation et de l'épaisseur de la plaque; il augmente avec cette vitesse jusqu'à ce que la déviation soit de 90° : alors l'aiguille tourne sans s'arrêter dans le même sens que la plaque. Les mêmes phénomènes ont lieu, mais à un moindre degré, lorsqu'on remplace le cuivre par d'autres matières. Ils diminuent dans un grand rapport, lorsque la continuité de la plaque tournante est interrompue par un assez petit nombre de fentes dirigées du centre à la circonférence, et disparaissent presque entièrement, si la plaque est remplacée par de la poussière ou de minces copeaux de la même matière. En interposant entre l'aiguille et le disque mobile des plaques de différents métaux ou de verre, l'action n'est point altérée; elle est, au contraire, fortement diminuée par l'interposition d'une plaque de fer, et presque détruite par deux; cette dernière observation est due à MM. Herschell et Babbage. Lorsque le disque est suspendu par un fil de cocon et qu'on fait tourner l'aimant au-dessous, le disque est entraîné : c'est évidemment ce qui doit arriver en vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction.

Les aiguilles ordinaires tournent difficilement, à cause de la force directrice de la terre; il est alors avantageux d'employer des aiguilles astatiques : la meilleure disposition consiste en un barreau ayant les mêmes pôles aux deux extrémités, et, par conséquent, un point conséquent au milieu, ou en deux aiguilles égales, les pôles de même nom en regard. Pour aimanter uniformément une aiguille, de manière que ses extrémités aient des pôles égaux et de même nom, la méthode la plus sûre consiste à la placer sur une spirale plate traversée par un courant hydro-électrique. Les aiguilles ainsi préparées sont les meilleures pour les expériences

dont il s'agit : elles obéissent très-bien aux mouvements des disques, même lorsqu'ils sont fendus ; seulement, elles tournent moins vite, mais ne reviennent jamais en arrière. Ces aiguilles sont préférables à toutes les autres pour découvrir de faibles traces de magnétisme. (M. Boettger, *A. C. et P.*, t. LXXV.)

850. Dans les expériences que nous venons de rapporter, la déviation ou la rotation est produite par une force perpendiculaire aux rayons du disque et parallèle à son plan ; mais la rotation de la plaque développe encore deux autres forces, dont l'une est perpendiculaire au plan du disque, et l'autre dirigée suivant les rayons. M. Arago a démontré l'existence de ces deux forces par les expériences suivantes. Une aiguille aimantée fut suspendue verticalement par un fil à l'extrémité du fléau d'une balance et équilibrée par des poids ; sous l'extrémité inférieure de l'aiguille, on fit tourner un disque de cuivre, et on observa une diminution de poids : ainsi la rotation du disque développe une force répulsive, perpendiculaire à sa surface. Pour constater l'existence d'une force dirigée suivant les rayons du disque, M. Arago dispose une aiguille d'inclinaison de manière que son plan de rotation soit perpendiculaire au méridien magnétique : l'aiguille est alors dirigée verticalement, et sous son extrémité inférieure il fait tourner un disque de cuivre. Lorsque le centre de rotation de l'aiguille est dans l'axe de rotation du disque, l'aiguille n'éprouve aucune déviation ; mais si on la fait marcher dans le même sens, de manière que son extrémité corresponde successivement aux différents points d'un rayon et de son prolongement, on remarque que, quand la pointe de l'aiguille tombe en dehors du disque, elle est repoussée loin du centre de rotation, que cette répulsion diminue à mesure que l'aiguille se rapproche du centre ; qu'elle devient nulle à une certaine distance, et se change en une force attractive qui diminue, et devient nulle de nouveau, quand l'aiguille est au centre. Ainsi, sur chaque rayon du disque, il y a un point entre le centre et la circonférence où la force dont il s'agit est nulle ; au delà elle est répulsive, et en deçà elle est attractive. Les différentes positions de l'aiguille sont indiquées dans la fig. 486.

851. Comme nous l'avons déjà dit, toutes les substances ne produisent pas, par leur rotation, les mêmes effets sur l'aiguille. Les métaux agissent beaucoup plus que les autres substances, et plusieurs physiciens n'ont pas obtenu d'effets sensibles avec le verre, le bois, l'eau, etc.

D'après MM. Herschell et Babbage, les effets relatifs des différents métaux sont représentés par les nombres suivants :

Cuivre.....	1,00	Zinc.....	0,93
Étain.....	0,46	Antimoine.....	0,09
Plomb.....	0,25	Bismuth.....	0,02

D'après MM. Prevost et Colladon, les angles de déviation augmentent proportionnellement à la vitesse de rotation, et les sinus des angles de déviation varient en raison inverse de la puissance 11,5 de la distance; mais d'autres physiciens ont trouvé des lois différentes pour l'influence de la distance.

852. Nous avons déjà dit qu'un plateau, garni de fentes dans le sens des rayons, perd une partie de son action, d'autant plus grande que le nombre des fentes est plus considérable, et qu'elle n'est point entièrement rétablie en remplissant les fentes par des poussières métalliques. MM. Herschell et Babbage ont reconnu que des disques de fer étamé ne perdent presque rien de leur action par des fentes dirigées suivant les rayons, lorsqu'elles sont remplies par de l'étain.

Ces mêmes physiciens, en opérant avec des disques de cuivre et de laiton d'abord pleins, puis garnis de huit fentes suivant les rayons, également espacées, et successivement vides et remplies par différentes soudures, et en les suspendant au-dessus d'un aimant auquel on donnait une vitesse de rotation uniforme, ont obtenu pour la force accélératrice qui faisait tourner le disque les valeurs suivantes :

Disque de laiton.		Disque de cuivre.	
Plein.....	1,00	Plein.....	1,00
Coupé suivant 8 rayons.....	0,24	Coupé suivant 8 rayons.....	0,20
Fentes soudées avec du bismuth.	0,53	Fentes soudées à l'étain.....	0,91
— — avec de l'étain..	0,88		

853. Suivant M. Haldat, un disque de fer doux agit avec plus d'énergie qu'un disque de cuivre; pour la même vitesse, il produit une déviation deux fois plus grande. Le fer fortement écroui se comporte comme le fer doux; mais un disque d'acier trempé ne produit point d'effet : l'aiguille, après quelques oscillations, reprend sa position primitive. Les disques incandescents produisent le même effet qu'à la température ordinaire. Cet habile physicien regarde les phénomènes dont il est question comme résultant de l'aimantation momentanée des disques. Nous reviendrons plus tard sur ce sujet.

854. Six mois après la publication de la découverte de M. Arago, M. Barlow communiqua à la Société royale de Londres des recherches fort intéressantes, relatives à l'action des globes de fer tournant sur une aiguille aimantée. Nous rapporterons quelques-uns des résultats obtenus par ce physicien. Une bombe de 8 pouces de diamètre tournait avec une vitesse de 720 tours par seconde autour d'un axe horizontal passant par son centre; une aiguille rendue sensiblement astatique [862], par un aimant convenablement placé, était successivement présentée à la même distance de la bombe, dans un plan horizontal passant par l'axe de rotation, et dans une direction tangentielle à la bombe. Dans toutes les directions de l'axe de rotation et dans tous les azimuths, l'extrémité nord de l'aiguille était attirée si le mouvement de la bombe était dirigé vers l'aiguille; elle était repoussée dans le cas contraire. Le maximum d'effet avait lieu à l'équateur, le minimum aux pôles de rotation. Si on élevait l'aiguille au-dessus du plan dans lequel nous l'avons supposée, elle était sollicitée dans le même sens jusqu'à une certaine hauteur; au delà l'action changeait de signe; cette hauteur angulaire dépendait de la direction de l'axe de rotation. M. Barlow a constaté que dans ces phénomènes les boulets pleins agissent avec une plus grande énergie que les boulets creux de même rayon.

Tous ces phénomènes se rattachent à d'autres, découverts par M. Faraday, et dont il sera question plus tard.

§ 9. *Magnétisme terrestre.*

855. L'action de la terre sur les aiguilles aimantées se manifeste non-seulement à sa surface, mais encore à de très-grandes hauteurs dans l'atmosphère, comme MM. Biot et Gay-Lussac l'ont reconnu, et à toutes les profondeurs auxquelles on est parvenu. La terre paraît agir comme un aimant dont les pôles magnétiques seraient situés sur une ligne sensiblement différente de son axe de rotation.

856. *Direction de la force magnétique de la terre.* Imaginons une aiguille aimantée librement suspendue par son centre de gravité : sa pesanteur étant détruite par la résistance du point de suspension, elle pourrait prendre autour de ce point toutes les positions possibles. Il est évident que l'aiguille se dirigerait parallèlement à la résultante totale des actions attractives et répulsives exercées par la terre sur ses éléments magnétiques : la direction de

cette résultante serait, par conséquent, donnée par celle de l'aiguille. L'hypothèse que nous venons de faire ne pouvant pas être réalisée, la direction du magnétisme terrestre ne peut pas être observée directement. Mais cette direction étant déterminée par l'angle que fait avec le méridien du lieu le plan vertical de l'aiguille, et par celui que forme l'aiguille avec l'horizon, angles que nous avons désignés sous les noms de *déclinaison* et d'*inclinaison*, il en résulte que la direction de l'action magnétique du globe est ramenée à la mesure de la déclinaison et de l'inclinaison. Ces angles peuvent être observés, le premier par une aiguille suspendue par son centre, de manière à se mouvoir dans un plan horizontal, et le second par une aiguille mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son centre de gravité et qu'on place perpendiculairement au méridien magnétique.

857. *Appareils employés pour mesurer la déclinaison.* Les appareils dont on se sert pour observer la déclinaison portent le nom de *boussoles*. Les boussoles sont formées d'une aiguille aimantée ayant ordinairement la forme d'une losange, garnie à son milieu d'une chape en matière dure, montée sur un pivot et lestée sur la partie sud de manière qu'elle se tienne en équilibre horizontalement; l'aiguille est renfermée dans une boîte munie d'une division circulaire. En plaçant dans le méridien géographique le diamètre qui passe par le zéro de la division, l'extrémité nord de l'aiguille indique la déclinaison. Les aiguilles doivent avoir la forme indiquée, parce que, d'après les expériences de Coulomb, c'est celle qui, à poids égal, produit la plus grande force directrice; elles doivent être très-minces, car, d'après le même physicien, le frottement de la chape sur la pointe est proportionnel au poids de l'aiguille, et l'intensité du magnétisme que peut acquérir une aiguille croît dans un plus petit rapport que son épaisseur.

Si une aiguille horizontale n'avait qu'une largeur infiniment petite, sa direction serait toujours celle des résultantes horizontales des actions magnétiques terrestres; mais comme il n'en est jamais ainsi, il peut arriver que l'axe de figure ne coïncide pas avec la direction de ces résultantes. En effet, soit AB (fig. 489) une aiguille aimantée; tous les points magnétiques de chaque moitié seront attirés et repoussés par les deux pôles de la terre : par conséquent, sur chaque moitié il y aura un point G par lequel passera la résultante de toutes ces actions. La ligne GG prendra donc la direction des forces parallèles appliquées aux points G, G, et si cette ligne ne coïncide pas avec l'axe de figure,

il est évident que les extrémités de l'aiguille n'indiqueront pas la déclinaison. Pour reconnaître si dans une aiguille l'axe magnétique coïncide avec l'axe de figure, il faut la retourner de manière que la face supérieure devienne la face inférieure : il est évident que l'axe magnétique ne changera pas de position, que l'axe de figure prendra la position A'B' (fig. 490), et que dans cette nouvelle position l'aiguille sera déviée d'une quantité égale, mais opposée; de sorte qu'en prenant le milieu de l'arc compris entre les extrémités de l'aiguille dans ces deux positions, on aura exactement la déclinaison.

Pour effectuer cette opération, on donne à l'aiguille la forme représentée fig. 487. Elle est percée à son centre d'un trou *o*, au moyen duquel on la place sur une chape garnie d'un rebord *mn* (fig. 488); par cette disposition on peut facilement exécuter le retournement.

Pour déterminer la déclinaison à l'aide de cet instrument, il faut, si l'appareil ne doit pas changer de place, que la méridienne du lieu soit tracée sur le cadran. Dans le cas où il devrait être transporté, et c'est le cas le plus ordinaire, il faudrait que l'on pût à chaque instant, et dans un lieu quelconque, déterminer la méridienne terrestre. Quelquefois les boussoles sont aussi employées pour mesurer l'angle qu'une direction déterminée fait avec le méridien magnétique. Pour satisfaire à ces différentes conditions, la boussole devient plus compliquée dans sa construction.

858. La boussole dont on se sert pour lever les plans est représentée fig. 478 *bis*. Elle est formée d'une boîte carrée en bois, renfermant un cadran divisé et une aiguille librement suspendue; le zéro de la division correspond à un diamètre parallèle au côté *cd*, contre lequel est appliqué un tuyau à section rectangulaire mobile autour d'un axe *oo'* qui le fixe à la caisse de la boussole ; ce tuyau est fermé d'un côté par une plaque mince, percée d'une fente verticale très-fine, et l'extrémité opposée est garnie d'un fil parallèle à la fente, disposé de manière que le plan de la fente et du fil soit parallèle à la ligne *gh* du cadran. Pour déterminer l'angle que la ligne qui joint deux points fait avec le méridien magnétique, on se place à l'un de ces points; on fixe la boussole horizontalement, et on la fait tourner dans son plan jusqu'à ce que, en regardant par la fente du tuyau, l'autre point soit placé derrière le fil : l'aiguille indique alors sur le cadran l'angle cherché.

859. Pour mesurer la déclinaison, on emploie l'appareil représenté en coupe verticale et en plan (fig. 491 et 492) : les mêmes let-

tres indiquent les mêmes objets dans les deux figures. *ab* aiguille; *cd* cercle divisé que parcourt l'extrémité de l'aiguille; *ef* boîte de la boussole; *gh* verre qui ferme la caisse où se trouve l'aiguille : elle est destinée à soustraire l'aiguille à l'agitation de l'air; *ik* axe solide fixé au fond de la boîte de la boussole; *lm* cercle fixé au pied de la boussole par six rayons, *np*, *n'p'* : ce cercle porte le nom de cercle azimuthal; *qr*, *q'r'* deux nonius diamétralement opposés, fixés à la caisse de la boussole, et qui parcourent le cercle azimuthal; *st* lunette mobile autour d'un axe parallèle au cercle azimuthal : elle porte à son foyer deux fils qui se croisent dans l'axe oblique; *u* nonius fixé à la lunette et qui parcourt le quart de cercle divisé *xy*, servant à indiquer l'angle du rayon visuel avec l'horizon; *z*, *z* vis destinées à rendre l'appareil horizontal.

Voici de quelle manière on se sert de cet instrument. On dirige la lunette sur un astre connu; on note l'instant de l'observation ainsi que la hauteur de l'astre sur l'horizon et l'angle formé par le plan que décrit la lunette avec l'aiguille; on calcule, au moyen des tables astronomiques, l'angle que le plan vertical de l'astre faisait avec le méridien astronomique à l'instant de l'observation, et on en déduit facilement l'angle du méridien magnétique avec le méridien astronomique. Si l'axe magnétique de l'aiguille ne coïncidait pas avec son axe de figure, il faudrait faire une seconde observation après avoir retourné l'aiguille, et prendre une moyenne entre les deux déclinaisons obtenues.

860. Pour les observations en mer, les boussoles sont disposées d'une autre manière. Les fig. 493 et 494 en présentent une coupe et un plan : *abcd* boîte de la boussole; *ef* vitre qui ferme la boîte; *gh* aiguille recouverte d'un disque de mica, sur lequel est collé un disque de papier, divisé en degrés et portant les signes des vents, et qu'on désigne sous le nom de *rose des vents* (fig. 495) : par cette disposition, la rose des vents se meut avec l'aiguille; *i* et *k* sont deux pinnules diamétralement opposées : la première porte une fente étroite, la seconde un fil très-délié; derrière la première se trouve un petit miroir incliné à 45°; la partie supérieure de la portion du miroir qui correspond à la fente de la pinnule est transparente, de manière qu'on puisse apercevoir le fil de l'autre pinnule.

La boîte de la boussole est suspendue par deux tourillons *l*, *m*, à un cercle *lmno*; ce dernier repose par deux autres tourillons *p*,*q*, placés perpendiculairement aux premiers sur un cercle *prqs*, fixé au châssis *tuvx*, consolidé sur un montant par le point P, et qui

peut tourner autour d'un axe vertical. Par cette disposition la boîte de la boussole reste toujours horizontale.

Pour observer la déclinaison au moyen de cet instrument, on dirige à l'aide des deux pinnules un rayon visuel vers un astre ou un objet placé à l'horizon, et on lit sur le miroir la division de la rose correspondante à cette direction. Pour avoir la déclinaison du lieu, il faut ensuite déterminer l'angle du méridien géographique avec le plan vertical de l'objet.

La boussole a été en usage chez les Chinois longtemps avant d'être connue en Europe. L'usage nautique de la boussole remonte à l'an 1150; mais elle ne fut généralement employée qu'en 1300. Les missionnaires jésuites assurent que l'on trouve chez les Chinois des indications que la connaissance de la boussole y remonte à une très-haute antiquité.

861. *Déviation de la boussole des navires par le fer qui entre dans leur construction ou dans leur charge.* Les grandes masses de fer qui entrent dans la construction des navires, dont les unes sont fixes et les autres mobiles, doivent exercer sur la boussole une action considérable. On a trouvé en effet qu'elle s'élevait quelquefois à 15° ou 20°. C'est Wales, astronome de l'expédition de Cook, qui, le premier, a signalé cette source d'erreurs dans les observations de la boussole en mer; mais c'est le professeur Barlow qui, le premier, a indiqué le moyen de corriger ces erreurs. Nous allons décrire la méthode qu'il a employée.

Dans un navire, la boussole peut être déviée 1° par la décomposition du fluide magnétique qu'elle détermine dans les substances magnétiques qui l'environnent; 2° par l'état magnétique permanent que peuvent avoir ces substances en vertu de leur force coercitive; 3° par l'état magnétique variable qu'elles prennent sous l'influence du magnétisme terrestre.

La première cause ne produit que de faibles actions, et l'on peut s'en garantir en plaçant l'habitacle à une grande distance des masses de fer du navire.

Quant à la seconde cause, si elle existait seule, on pourrait facilement en mesurer l'influence. En effet, chaque corps magnétique agirait toujours de la même manière sur l'aiguille; et comme chacun d'eux est très-éloigné de l'aiguille relativement à sa longueur, son action se réduirait à un couple, et tous les couples résultant de l'action des différents corps magnétiques se réduiraient en un couple unique, qui se combinerait avec le couple résultant de l'action

de la terre pour produire la direction de l'aiguille. Quand le navire tournerait sur sa quille, le couple terrestre conserverait la même position dans l'espace, tandis que l'autre, devant toujours conserver la même position relativement à l'axe du navire, tournerait avec lui : alors la direction de l'aiguille changerait continuellement; mais il est facile de voir que, dans le mouvement de rotation du navire, l'aiguille éprouverait par le couple étranger des déviations qui pousseraient l'aiguille tantôt à l'est et tantôt à l'ouest, et que les déviations dans deux directions opposées seraient égales et de signes contraires : par conséquent, en prenant la moyenne de ces déclinaisons, on obtiendrait la déclinaison vraie.

La troisième cause est beaucoup plus puissante que les deux autres et ses effets sont sans cesse variables, parce que, tous les corps magnétiques du navire changeant de position par rapport à l'axe magnétique de la terre avec la position du navire, ils deviennent des aimants dans lesquels l'intensité magnétique et la position des pôles changent continuellement, quand le navire tourne sur lui-même, et dans lesquels ces variations sont encore modifiées, lorsque le navire est en marche, par les changements de direction et d'intensité du couple terrestre. Pour neutraliser l'influence de la deuxième et de la dernière cause de dérangement de l'aiguille, M. Barlow a proposé le moyen suivant.

Le bâtiment étant dans une rade tranquille, où l'on peut facilement le faire tourner sur sa quille, un observateur s'établit près de l'habitacle avec un instrument propre à mesurer les angles; un autre observateur s'établit sur le rivage, en un point que l'on puisse facilement apercevoir du navire, avec une boussole et un instrument destiné à mesurer les angles. A un signal donné, chacun des observateurs dirige sa lunette vers l'autre station, et détermine l'angle formé par l'aiguille de sa boussole avec la projection horizontale de l'axe de la lunette. Les projections horizontales des deux axes des lunettes étant sur le prolongement l'une de l'autre, il est évident que, si l'aiguille du navire n'éprouvait point de déviation, sa direction devrait être parallèle à celle qui est à terre et, par conséquent, elles devraient faire le même angle avec l'axe de la lunette : la différence de ces deux angles est donc la déviation produite par les corps magnétiques du navire. Si alors on fait tourner le navire sur sa quille, et qu'à chaque angle de 10 ou 12 degrés on fasse des observations semblables, on aura, pour chacune de ces positions, la valeur de la déviation produite par les circonstances locales. Lors-

que ces opérations sont terminées, l'observateur du rivage substitue à sa boussole celle du navire; il la fixe à une caisse en bois (fig. 496), que l'on peut faire tourner autour d'un axe vertical, dirigé suivant le prolongement du pivot de l'aiguille. Cette cage est percée latéralement de trous circulaires, destinés à recevoir le *compensateur*. Il se compose d'une tige en cuivre rouge de 1 pouce 1/2 de diamètre, et de deux plaques de fer M et M' de 12 et 13 pouces de diamètre (mesures anglaises), et d'une épaisseur telle que le pied carré pèse 13 livres. Ces deux plaques sont séparées par une feuille de carton, serrées par des écrous placés à leurs circonférences, et fixées sur la tige de cuivre par des écrous qui marchent sur cette tige. On fait tourner l'appareil et l'on règle la position du compensateur de manière qu'il produise sur l'aiguille, dans les différentes directions, les mêmes variations qu'elle éprouvait sur le navire par les masses magnétiques qui s'y trouvent. La position du centre des plaques par rapport à l'aiguille étant déterminée, on porte ensuite l'appareil dans l'habitacle et on règle la direction de la caisse de manière qu'elle soit placée, par rapport à l'aiguille, de la même manière : par ce moyen la déviation de l'aiguille se trouve doublée, et c'est ce qui donne le moyen de la mesurer, car il suffit d'observer la déclinaison en enlevant le plateau MM', et ensuite en le plaçant : la différence est la correction qu'il faut faire à la première opération. Par exemple, si la déclinaison sans le compensateur était de 30° et qu'elle fût de 36 avec le plateau, la déclinaison corrigée serait de 24°.

Cet ingénieux procédé ne peut être considéré que comme une approximation : 1° parce que les changements de température agissent sur la force coercitive des substances magnétiques du navire et sur la position du compensateur; 2° parce que la force magnétique de la terre n'agit pas de la même manière dans tous les lieux, à cause des variations d'inclinaison et d'intensité.

862. *Aiguilles astatiques.* On désigne ainsi des aiguilles aimantées disposées de manière à n'être point influencées par l'action de la terre. On peut remplir cette condition de plusieurs manières que nous allons successivement faire connaître.

1°. On soustrait une aiguille à l'action de la terre, en plaçant dans le méridien magnétique, et à une distance convenable, un aimant puissant dirigeant vers elle son pôle répulsif. Par ce moyen, l'action de la terre ne peut cependant pas être complétement dissimulée, parce que, cette action se rédui-

sant à un couple, il ne peut être détruit que par un couple opposé; ce qui exigerait que l'aimant fût à une très-grande distance de l'aiguille.

2°. On peut disposer deux aiguilles de même forme, de même longueur, et également aimantées, soit sur un même axe vertical, de manière que les pôles de noms contraires soient en regard (fig. 497), soit dans la même direction (fig. 498), mais d'une manière symétrique. Il est évident que l'action de la terre se manifestant en sens contraire sur les deux aiguilles, il n'en résulte aucune force directrice, pourvu toutefois, que les aiguilles soient bien identiques pour la forme, le degré d'aimantation et la distribution du magnétisme.

3°. On pourrait aussi employer une aiguille verticale fixée à un levier horizontal mobile autour d'un axe vertical (fig. 499), ou deux aiguilles égales, placées symétriquement aux deux extrémités d'un levier horizontal (fig. 500).

4°. Enfin, on peut disposer une aiguille de manière qu'elle n'éprouve aucune influence de la part du magnétisme terrestre, en la rendant mobile autour d'un axe parallèle à l'axe magnétique de la terre : car il est évident que l'action de la terre tendra à faire mouvoir l'aiguille dans une direction que sa suspension rend impossible. La fig. 501 représente une aiguille astatique disposée de cette manière. L'aiguille *ab* est traversée à son centre de gravité par l'axe *cd*, mobile dans deux tourillons fixés au cadre *efgh* fixé lui-même au cercle XY. Le limbe que parcourt l'aiguille est soudé à la pièce MN, que l'on fait mouvoir dans son plan à l'aide de la vis sans fin P, et le cercle MN peut tourner autour d'un axe vertical au moyen du cercle R et de la vis sans fin S; la vis T sert à maintenir l'appareil à différentes hauteurs. Il est facile de voir qu'à l'aide de ces deux mouvemements rectangulaires on peut toujours donner au limbe une direction quelconque.

863. *Déclinaison dans les différents lieux.* Dans les différents lieux, la déclinaison est tantôt orientale, tantôt occidentale. La déclinaison est orientale quand le pôle austral de l'aiguille, c'est-à-dire celui qui se tourne vers le nord, se dirige vers l'est; elle est occidentale, quand ce même pôle se dirige vers l'ouest. Les lignes qui passent par les points où la déclinaison est nulle portent le nom de *lignes sans déclinaison*. On en connaît quatre; elles sont très-irrégulières. La première est située dans le grand Océan, entre l'ancien et le nouveau monde; la seconde commence au-dessous de la

Nouvelle-Hollande et se prolonge jusqu'en Laponie ; la troisième communique avec la seconde près du grand archipel d'Asie, et s'élève jusque dans la partie orientale de la Sibérie ; enfin la quatrième paraît se trouver dans l'océan Pacifique, près des îles des Amis et de la Société. Leur position n'est pas constante. La première a éprouvé, d'une manière irrégulière, un grand déplacement depuis un siècle et demi.

864. Dans un même lieu, la déclinaison reste quelquefois constante pendant un certain temps; mais, en général, elle est variable, comme on peut le voir par le tableau suivant :

Tableau de la déclinaison de l'aiguille aimantée à Paris.

Année 1580	11°	30′	est.	Année 1819	22°	25′	ouest.
1618	8	»		1820	»	»	
1663	0	»		1821	»	»	
1678	1	30	ouest.	1822	22	11	
1700	8	10		1823	22	23	
1767	19	16		1824	22	23	
1780	19	55		1825	22	22	
1785	22	»		1826	»	»	
1805	21	5		1827	22	20	
1813	22	28		1828	22	5	
1814	22	34		1829	22	12	
1816	22	25		1832	22	3	
1817	22	19		1835	22	4	
1818	22	22					

Les variations de la déclinaison ont été observées pour la première fois en 1622, par Gunter, professeur au collége de Gresham.

865. *Variations diurnes.* Indépendamment des variations que l'aiguille de déclinaison éprouve par les changements de lieu, et dans le même lieu à de grands intervalles, elle éprouve encore des variations diurnes. Dans l'hémisphère nord, la pointe nord de l'aiguille marche de l'est à l'ouest de 8 heures 1/4 du matin à 1 heure 1/4 après midi, et de l'ouest à l'est, de 1 heure 1/4 après midi, jusqu'au lendemain matin ; dans l'hémisphère sud, la pointe sud de l'aiguille éprouve le même mouvement. Ainsi les extrémités voisines et opposées de deux aiguilles placées dans le même méridien et dans les deux hémisphères, marchent dans le même sens. Il existe probablement une ligne où l'aiguille reste stationnaire, puisque les mouvements sont contraires dans les deux hémisphères; mais on ignore si elle coïncide avec l'équateur ou si elle en diffère. C'est entre les équinoxes du printemps et d'automne qu'ont lieu les plus

grandes variations diurnes, et c'est dans l'autre partie de l'année que se manifestent les plus petites. L'étendue de ces variations change avec les lieux : les plus grandes sont, à Paris, de 13′ à 16′, et les plus petites de 8′ à 10′. Il résulte en outre de la comparaison des observations de la déclinaison aux mêmes heures du jour, que la pointe nord de l'aiguille marche vers l'est depuis l'équinoxe du printemps jusqu'au solstice d'été suivant et vers l'ouest le reste de l'année.

Ces mêmes variations se manifestent dans les caves de l'Observatoire, qui sont à plus de 26 mètres au-dessous de la surface du sol.

Dans les régions du nord, il paraît que les variations diurnes sont plus considérables et moins régulières; l'aiguille ne reste point stationnaire pendant la nuit, et c'est vers le soir seulement qu'elle atteint son maximum de déviation occidentale. Lorsqu'on s'approche de l'équateur magnétique [870], l'amplitude des variations diurnes va en décroissant, et à l'équateur magnétique elles sont sensiblement nulles. D'après Aymé (*A. C. et P.*, t. x), à qui on doit un beau travail sur l'objet dont il est question, les *maxima* et les *minima* des déclinaisons dans un même lieu se manifestent à des époques très-rapprochées de celles qui correspondent aux *maxima* et *minima* de température.

Les variations diurnes de l'aiguille ne peuvent s'observer qu'à l'aide d'instruments susceptibles d'une grande précision, que l'on désigne sous le nom de *boussoles de variation*. Ces instruments se composent ordinairement d'un barreau aimanté, suspendu à un faisceau de fils de soie sans torsion, qui peut se mouvoir dans un boîte fermée par une glace; les deux extrémités du barreau parcourent des arcs de cercle divisés en très-petites fractions de degrés, sur lesquels on lit la position de l'extrémité du barreau à l'aide d'une loupe fixe.

866. La boussole de déclinaison est quelquefois dérangée de sa position, ou troublée dans ses variations diurnes par plusieurs causes accidentelles. Une des plus influentes est l'apparition des aurores boréales (1). Quand ce météore apparaît, pendant toute sa durée, qui est quelquefois de dix à douze heures, l'aiguille aimantée éprouve une agitation continuelle et une déviation souvent con-

(1) L'aurore boréale paraît accidentellement dans le nord, tantôt comme une lueur vague répandue près de l'horizon et semblable à l'aurore; d'autres fois, sous la forme de fusées phosphorescentes, qui parcourent et illuminent en un moment toute l'atmosphère.

sidérable. Ces perturbations se manifestent non-seulement dans le lieu où l'aurore boréale est visible, mais à de grandes distances, et dans des lieux où l'on n'aperçoit aucune trace de lumière dans l'atmosphère. Par exemple, des aurores qui ne sont visibles qu'à Pétersbourg, en Sibérie ou en Amérique, agissent à Paris sur l'aiguille aimantée. Cependant l'agitation de la boussole est d'autant plus grande que l'instrument est plus rapproché du lieu où le phénomène se développe.

Les tremblements de terre et les éruptions volcaniques paraissent aussi agir sur l'aiguille aimantée. On prétend que les orages ont également de l'influence sur la boussole. Ce qu'il y a de positif, c'est que, quand la foudre tombe sur des corps aimantés ou dans leur voisinage, elle altère leur état magnétique, et même quelquefois renverse leurs pôles : car on a vu des boussoles de navire éprouver subitement une déviation d'une demi-circonférence par l'effet de la foudre.

867. *Appareils destinés à mesurer l'inclinaison.* L'appareil dont on se sert ordinairement pour mesurer l'inclinaison et qu'on désigne sous le nom de *boussole d'inclinaison*, est composé (fig. 502, 503 et 504) d'un plateau circulaire divisé AB, qu'on établit horizontalement au moyen de trois vis *a, b, c,* et de deux niveaux à bulle d'air. Il supporte un cercle vertical fixé sur des montants C, D, qui peuvent se mouvoir autour du centre du cercle horizontal. Les pièces horizontales EF portent, à la hauteur du centre du cercle vertical, une aiguille qui repose sur de petits coussinets en agate par un axe très-délié passant par son centre de gravité. Lorsqu'on place le plan du cercle mobile de manière qu'il soit perpendiculaire au méridien magnétique, la force directrice de la terre rend l'aiguille verticale, parce que, dans cette position, les composantes horizontales de cette force sont détruites. Lorsqu'on fait tourner lentement le cercle vertical, l'aiguille s'incline de plus en plus, et atteint son maximum d'inclinaison, quand le cercle est dans le méridien magnétique. Pour observer l'inclinaison, on commence par amener le cercle dans l'azimuth où l'aiguille est verticale, et, au moyen du cercle horizontal divisé, on le place à 90° de distance angulaire : il est alors dans le méridien magnétique, et on compte l'inclinaison sur le limbe. Il peut se présenter ici la même cause d'erreur que dans les boussoles de déclinaison : l'axe magnétique peut ne pas coïncider avec l'axe de figure ; alors par le retournement on corrige l'erreur. Mais il en est encore une autre dont l'in-

fluence peut être beaucoup plus grande, c'est le défaut de coïncidence du centre de gravité avec l'axe de rotation. Pour reconnaître ce défaut, s'il existe, et en mesurer l'influence, il faut changer les pôles de l'aiguille. Il est évident que la déviation de l'aiguille provenant de la cause dont il vient d'être question, se trouvera en sens contraire, et, par conséquent, la demi-somme des inclinaisons observées avant et après le changement des pôles sera l'inclinaison vraie.

On peut déterminer, par une construction géométrique très-simple, l'inclinaison que prendra l'aiguille dans les différentes positions que l'on pourra donner au limbe de l'instrument autour de la verticale.

En effet, soit CD (fig. 505) la verticale du lieu, CDZ le méridien magnétique, de sorte que DZ soit la direction de l'aiguille de déclinaison et B le point de rencontre de l'axe CB de l'aiguille avec la ligne horizontale DZ. Décrivons sur BD, comme diamètre, une circonférence; si on dirige le limbe de l'instrument dans un plan vertical CDX, CE sera la direction de l'axe de l'aiguille; car, BE est perpendiculaire sur CDX : par conséquent CE est la projection de CB sur le plan CDX.

Si on désigne par θ l'angle XDZ, par a l'inclinaison BCD dans le plan du méridien magnétique, et par x l'inclinaison dans le plan vertical CDX qui fait un angle θ avec le méridien, on aura

$$DE = DB \cos\theta, \text{ et } \operatorname{tang} x = \operatorname{tang} a \cos\theta. \quad (a).$$

On voit facilement sur la figure, et en discutant cette formule, que le maximum d'inclinaison a lieu dans le méridien, et que l'aiguille se dirige verticalement quand le plan du limbe de l'instrument est perpendiculaire au plan du méridien magnétique.

Cette construction fait voir que l'on peut déterminer l'inclinaison dans le méridien magnétique, lorsqu'on connaît l'inclinaison dans deux plans perpendiculaires entre eux, sans qu'il soit besoin de connaître la déclinaison : car, si les plans CDX et CDX′ sont rectangulaires,

$$DB = EF, \text{ et } EF^2 = DE^2 + DF^2;$$

ce qui donne $$\operatorname{tang}^2 a = \operatorname{tang}^2 x + \operatorname{tang}^2 x'.$$

Cette formule peut également se déduire de la formule (a).

868. La boussole d'inclinaison peut servir à déterminer la déclinaison, car l'aiguille est verticale quand le plan du limbe est perpendiculaire au méridien magnétique. Ainsi, en cherchant par tâtonnement la position du limbe où l'aiguille reste verticale, le méridien magnétique est perpendiculaire à ce plan. On pourrait aussi chercher la position du limbe dans laquelle l'inclinaison est à son maximum, ce plan serait celui du méridien magnétique.

869. L'inclinaison peut encore être déterminée par un autre procédé qu'il est bon de connaître. L'action directrice de la terre peut être considérée comme formée de deux composantes, l'une verticale et l'autre horizontale. Si on parvenait à trouver le rapport de ces deux forces, on en déduirait facilement la position de la résultante. Pour cela, concevons qu'on ait une aiguille soutenue par un axe horizontal passant par son centre de gravité, se mouvant librement dans le méridien : cette aiguille s'inclinera en vertu de la composante verticale de l'action directrice de la terre, et si on la rend horizontale en appliquant un certain poids sur la partie qui s'élève, ce poids, multiplié par sa distance au point de suspension, fera équilibre à la composante verticale et, par conséquent, lui sera égal. Quant à la détermination de la composante horizontale, on y parvient facilement en observant la durée des oscillations horizontales de l'aiguille.

En effet, on trouve par le calcul que la somme des moments des forces qui tendent à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique est égale à

$$\frac{\pi p l^2}{g T^2} \cdots (b),$$

π étant le rapport de la circonférence au diamètre, p le poids de l'aiguille, l la moitié de sa longueur, g l'intensité de la pesanteur et T la durée d'une oscillation, la force étant appliquée à l'unité de distance. En désignant cette force par H, la composante verticale par V, et par i l'inclinaison, on aura

$$\tang i = \frac{V}{H}.$$

Dans une expérience faite par Coulomb, l'aiguille avait la forme d'un parallélipipède rectangle ; sa longueur était de $426^{mm},6$, sa largeur de 13^{mm}, son épaisseur de 2^{mm}. Cette aiguille fut d'abord aimantée : suspendue horizontalement à des fils de soie, elle fit 50 oscillations en 495 secondes; elle fut ensuite suspendue de manière à devenir mobile autour d'un axe passant à peu près par son centre de gravité, et on reconnut que pour la rendre horizontale il fallait un poids de 200 milligrammes placés à une distance de $170^{mm},75$ du point de suspension, ce qui donnait 34150 pour le moment statique. L'aiguille fut alors aimantée en sens contraire, et on obtint pour le moment statique 40546. En prenant la moyenne on trouve 37348 pour sa valeur exacte. On avait pour les autres données

$$l = 213,3, \quad T = \frac{495}{50} = 9'',9, \quad p = 88808, \quad g = 9808^{mm},8.$$

En substituant ces nombres dans la formule on trouve

$$i = 69^\circ\ 41'\ 18''.$$

870. *De l'inclinaison dans les différents points du globe.* On désigne sous le nom d'*équateur magnétique* la courbe qui passe par tous les points où l'inclinaison est nulle. On avait cru d'abord que cette courbe était un grand cercle incliné de 12° sur le plan de l'équateur, et qui coupait ce dernier en deux points, dont l'un était situé dans la mer du Sud à 115° 34′ de longitude occidentale; et l'autre à 295° 34′ de longitude également occidentale. Mais M. Biot, en discutant les observations de Cook et de Williams Bayly, démontra que l'équateur magnétique se relevait au delà du nœud occidental et qu'il venait de nouveau couper l'équateur. MM. Morelet et Hausten, qui se sont récemment occupés de la détermination de l'équateur magnétique, en discutant toutes les observations faites avant eux, ont trouvé des résultats peu différents. Ces deux physiciens placent l'équateur magnétique en totalité au-dessous de l'équateur terrestre, entre l'Afrique et l'Amérique; le plus grand écart qui est de 13° à 14°, correspond à 25° de longitude occidentale. Un des nœuds se trouve en Afrique par 22° ou 18° de longitude orientale. En partant de ce nœud du côté de la mer des Indes, la ligne sans inclinaison s'éloigne vers le nord de l'équateur terrestre, sort de l'Afrique un peu au sud du cap Guardafui et atteint sa plus grande élévation boréale (12°) dans la mer d'Arabie par 62° de longitude orientale; au delà, l'équateur magnétique, toujours situé dans l'hémisphère boréal, coupe la presqu'île de l'Inde un peu au nord du cap Comorin, traverse le golfe du Bengale en se rapprochant un peu de l'équateur terrestre, dont il n'était éloigné que de 8° à l'entrée du golfe de Siam; remonte ensuite un peu au nord, est presque tangent à la pointe de Bornéo, traverse l'île de Paragua, le détroit qui sépare la plus méridionale des Philippines de l'île Mindanao et, sous le méridien de Waigiou, se trouve de nouveau placé à 9° de latitude nord. De là, après avoir passé dans l'archipel des Carolines, l'équateur magnétique descend rapidement vers l'équateur terrestre et le coupe, d'après Morelet, par 174°, et, suivant Hanstéen, par 187° de longitude orientale. Il y a beaucoup moins d'incertitude sur la position d'un troisième nœud situé dans l'océan Pacifique par 120° environ de longitude occidentale; mais M. Morelet admet que l'équateur magnétique, après avoir seulement touché l'équateur terrestre, s'infléchit aussitôt vers le sud. M. Hanstéen suppose que cette courbe passe dans l'hémisphère boréal sur une étendue d'environ 15° de longitude, et revient ensuite couper la ligne équinoxiale à 23° de la côte occiden-

tale de l'Amérique. La divergence des deux courbes dans cette partie de leur course est beaucoup moins grande qu'elle ne paraît, car elles ne sont nulle part à 2° de distance l'une de l'autre dans le sens des cercles de latitude.

En comparant ces observations à celles plus récentes faites par M. Freycinet, le capitaine Sabine et l'amiral Duperrey, il paraît très-probable que l'équateur magnétique est mobile, et qu'il est doué d'un mouvement de translation d'orient en occident; c'est probablement à ce mouvement que sont dues les variations que l'inclinaison éprouve avec le temps dans un même lieu.

D'après M. Duperrey, qui, dans son voyage autour du monde, a coupé six fois l'équateur magnétique, cette courbe ne couperait la ligne équinoxiale qu'en deux points, qui seraient presque diamétralement opposés, et situés, l'un dans l'océan Atlantique, l'autre dans le Grand Océan, à peu près dans le plan du méridien de Paris; que là, où cet équateur ne rencontrerait que quelques îles éparses, il ne s'éloignerait que bien peu de la ligne équinoxiale; il s'en écarterait davantage, lorsque les îles se multiplient, et ne parviendrait à son maximum d'excursion, soit au nord, soit au sud, que dans les deux grands continents qu'il traverse; qu'enfin il existerait entre les sections australes et boréales de cette courbe singulière une symétrie remarquable et beaucoup plus parfaite qu'on ne l'avait supposé.

De chaque côté de l'équateur, l'inclinaison augmente à mesure qu'on s'en éloigne; mais dans l'hémisphère austral c'est le pôle boréal qui plonge au-dessous de l'horizon, et c'est le contraire dans l'autre hémisphère. Les deux points du globe où l'inclinaison est de 90° portent le nom de pôles magnétiques. D'après M. Duperrey, l'un est placé au nord de l'Amérique septentrionale par 70° 10′ N. et 100° 40′ O.; l'autre au sud de la Nouvelle-Hollande par 75° 0′ S. et 136° 0′ E. Ces positions des pôles ont été confirmées par de nouvelles observations.

Dans la détermination des points de l'équateur magnétique, on fait usage non-seulement des points de cette courbe qui ont été observés directement, mais des inclinaisons observées dans le voisinage, en se servant de cette loi, déduite de l'observation, que la tangente de la latitude magnétique est égale à la moitié de la tangente de l'inclinaison, pourvu que cette dernière ne dépasse pas 30°.

Le tableau suivant renferme les inclinaisons observées à Paris de 1670 à 1835.

Tableau de l'inclinaison de l'aiguille aimantée à Paris.

Année	1670	75°	00′	Année	1819	68°	25′
	1754	72	15		1820	68	20
	1756	72	25		1821	68	14
	1780	71	48		1822	68	11
	1791	70	52		1823	68	8
	1798	69	51		1824	68	7
	1806	69	12		1825	68	»
	1810	68	50		1826	68	»
	1814	68	36		1829	67	41
	1816	68	40		1831	67	4
	1817	68	38		1835	67	24
	1818	68	35				

L'inclinaison est soumise, comme la déclinaison, à des variations diurnes et annuelles. Imaginons une aiguille aimantée réduite à une ligne géométrique et mobile autour de son milieu. Les deux extrémités décriront des courbes. Les variations de la déclinaison seront représentées par les rayons tangents à la projection horizontale de la courbe, et les limites de l'inclinaison par les rayons qui passeront par les points les plus hauts et les plus bas. Si le mouvement était uniforme, les maxima de vitesse de la déclinaison correspondraient aux limites d'excursion de l'inclinaison, et quand la vitesse de projection sur le plan vertical serait un maximum, celle observée sur le plan horizontal serait nulle. Ces lois ont été vérifiées par Aymé, sur les observations du colonel Sabine faites à Toronto, dans le Canada. (*A. C. et P.*, t. XVII.)

871. *Mesure de l'intensité du magnétisme terrestre.* La direction de la force magnétique de la terre ne changeant pas sensiblement dans des lieux voisins, il en résulte que l'on peut regarder comme parallèles les actions exercées par la terre sur chaque point magnétique d'un aimant. Par conséquent, une aiguille d'inclinaison est par rapport à l'action magnétique du globe, comme un pendule relativement à la pesanteur. Ainsi, en faisant osciller une aiguille d'inclinaison, la durée des oscillations dépendra de son intensité magnétique, de sa longueur et de l'intensité du magnétisme terrestre. En faisant osciller une même aiguille dans différents temps et dans différents lieux, en supposant que son intensité magnétique fût invariable, on en déduirait, pour le temps et le lieu de l'observation, l'intensité du magnétisme terrestre : ces intensités seraient proportionnelles aux carrés des nombres d'oscillations faites dans le même temps. Cependant, on emploie rarement à cet usage les

aiguilles d'inclinaison; leur mode de suspension produit trop de frottement et occasionnerait de trop grandes erreurs. On fait ordinairement osciller des barreaux aimantés, suspendus à des fils de soie tels qu'ils sortent du cocon, au moyen d'un étrier qui les rend horizontaux; et pour éviter l'influence de l'air, on les renferme dans des cages de bois, dont une des faces est garnie d'une glace. Les oscillations d'une aiguille horizontale ne déterminent que l'intensité de la composante horizontale de la force magnétique terrestre; mais en combinant cette composante avec l'inclinaison, on en déduit facilement l'intensité de la force totale.

En désignant par F l'intensité magnétique de la terre, par f celle de l'aiguille, par i l'inclinaison et par n le nombre d'oscillations de l'aiguille horizontale dans un temps donné; par F', f', i' et n' les mêmes éléments pour un autre lieu, les composantes horizontales de la force directrice seront $Ff \cos i$ et $F'f \cos i'$, et on aura

$$\frac{Ff \cos i}{F'f \cos i'} = \frac{n^2}{n'^2}; \quad \text{d'où } \frac{F}{F'} = \frac{n^2 \cos i'}{n'^2 \cos i}.$$

Si l'on voulait avoir égard à la torsion du fil de suspension, il faudrait remplacer l'aiguille aimantée par une aiguille de laiton, de même forme et de même poids, et observer le nombre N d'oscillations qu'elle fait dans le même temps que l'aiguille aimantée en fait n; alors en désignant par g la force de torsion appliquée aux pôles de l'aiguille, et par k un coefficient constant, on aurait $g + F = n^2k$, et $g = N^2k$; d'où $F = k(n^2 - N^2)$. Ainsi, dans la formule précédente, il faudrait remplacer n^2 et n'^2 par $n^2 - N^2$, et par $n'^2 - N^2$.

Il y a cependant, dans la méthode des oscillations horizontales, une cause d'erreur qui peut avoir une grande influence. Un des pôles de l'aiguille ayant une tendance à s'abaisser au-dessous de l'horizon, il en résulte que le prolongement du fil de suspension ne passe jamais par le centre de gravité : de là une différence entre les longueurs des deux bras de levier de l'aiguille horizontale qui varie avec l'inclinaison. Cette différence peut occasionner de grandes erreurs dans la comparaison des oscillations d'une même aiguille faites dans des lieux où il existe une grande différence dans l'inclinaison.

872. La détermination des rapports des intensités du magnétisme terrestre, dans différents lieux et en différents temps, présente beaucoup d'incertitude, parce que les changements de température et d'autres circonstances peuvent faire varier l'état magnétique de l'aiguille. Jusqu'ici on n'avait trouvé aucun moyen de faire disparaître cet inconvénient; mais Poisson et M. Arago ont découvert deux méthodes au moyen desquelles les intensités magnétiques peuvent être déterminées avec une grande exactitude. La méthode de Poisson consiste à faire osciller deux aiguilles d'inclinaison,

d'abord séparément, puis sous leur influence mutuelle, en plaçant leur centre de rotation dans une ligne parallèle à l'axe magnétique du globe : les vitesses d'oscillation de ces trois systèmes, les distances des centres de gravité, et les moments d'inertie par rapport aux axes de rotation, sont liés entre eux de telle manière qu'on en déduit la puissance magnétique de la terre, indépendamment de la force magnétique des aiguilles. Par le procédé de M. Arago on mesure l'intensité magnétique d'une aiguille indépendamment de la force directrice de la terre. Il est fondé sur l'observation déjà rapportée, faite par ce célèbre physicien, qu'un plateau métallique tournant sur lui-même, dans le voisinage d'une aiguille aimantée, l'entraîne dans le sens de son mouvement avec une force d'autant plus considérable que la puissance magnétique de l'aiguille est plus grande. En faisant l'expérience dans un plan perpendiculaire à l'axe magnétique, l'influence de la force directrice de la terre sera nulle : alors les petits contrepoids dont l'une des extrémités de l'aiguille devrait être chargée pour que le plateau, tournant avec une certaine vitesse, la déviât de 10°, 20° ou 30°, etc., donneraient la mesure de l'intensité magnétique de ses pôles. Si l'on admettait la possibilité d'obtenir, à différentes époques, du fer doux ayant exactement les mêmes propriétés, on pourrait mesurer l'intensité des pôles d'une aiguille en la plaçant, chargée d'un petit contre-poids, dans un plan perpendiculaire à l'axe magnétique, et mesurant la déviation que lui fait éprouver une même masse de fer placée à une distance déterminée.

873. Toutes les observations faites jusqu'ici constatent que l'intensité magnétique de la terre, augmente à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur magnétique; aux pôles elle paraît être une fois et demie plus grande qu'à l'équateur, de sorte que la ligne sans inclinaison est en même temps la ligne de moindre intensité. On a aussi reconnu que les lignes de même intensité ou *isodynamiques* diffèrent beaucoup par leur forme et leur position des lignes de même inclinaison : d'où il suit que sur l'équateur magnétique les intensités ne sont pas partout les mêmes, ce qui est d'accord avec l'observation. D'après M. Duperrey, les lignes isodynamiques et les lignes isothermes ont la plus grande analogie dans leur courbure et leur direction. Cet habile navigateur a aussi reconnu que les points de l'équateur magnétique sont précisément les points les plus chauds de chaque méridien; et il pense que les irrégularités des lignes magnétiques à

la surface de la terre proviennent des anomalies que présentent les températures à la surface des mers et des continents.

Suivant Hanstéen, l'intensité magnétique dans un même lieu est soumise à des variations périodiques, diurnes et annuelles. Le minimum diurne a lieu à 11 heures du matin, le maximum à 4 heures du soir en été, et à 6 heures en hiver; le minimum annuel en hiver, et le maximum en été.

874. D'après les expériences faites par MM. Biot et Gay-Lussac dans leurs voyages aérostatiques, celles de M. de Humboldt dans les pays de montagnes, et celles beaucoup plus anciennes de Saussure, il semblait que l'action magnétique terrestre était la même à la surface de la terre et aux plus grandes hauteurs accessibles à l'homme; mais ces expériences n'ayant pas été corrigées de l'influence de la température, et les expériences de M. Kupffer ne permettant pas de douter qu'un abaissement de température n'augmente le nombre des oscillations d'une aiguille, la constance de ce nombre trouvé par les physiciens que nous avons nommés, prouve que l'intensité du magnétisme terrestre diminue à mesure qu'on s'éloigne de sa surface; c'est ce que démontrent d'ailleurs les expériences faites dans le Caucase par M. Kupffer. On n'a pas pu constater par expérience si l'inclinaison est la même au-dessus, au-dessous et à la surface du sol; car les observations dans les ballons sont impossibles, et la différence de composition du sol peut occasionner de grandes erreurs dans ces déterminations au-dessous du sol.

875. Il résulte de tous ces faits que la déclinaison, l'inclinaison, et peut-être aussi l'intensité magnétique, éprouvent dans chaque lieu des variations séculaires, d'autres qui sont périodiques, diurnes ou annuelles, dont on ne connaît point encore les lois; mais comme des observatoires fixes ont été établis sur un grand nombre de points répartis sur toute la surface du globe, les observations se multiplient, et permettront dans un petit nombre d'années de déterminer les lois de ces phénomènes.

On avait admis que l'action magnétique de la terre était due à deux pôles magnétiques; en déterminant leur position de manière à satisfaire aux observations, M. Biot avait trouvé qu'ils devaient être très-voisins l'un de l'autre et du centre de la terre; mais pour rendre compte des inégalités de l'équateur magnétique, il faudrait supposer d'autres centres magnétiques, et cette hypothèse n'expliquerait point les importantes observations de M. Duperrey et les variations périodiques. Dans l'état actuel de la science, il est beau-

coup plus probable que l'action magnétique du globe provient des courants thermo-électriques qui se produisent périodiquement par les mouvements diurnes et annuels du soleil, ou du moins est modifiée par eux ; mais cette question ne pourra être étudiée que quand on connaîtra parfaitement les lois du magnétisme terrestre.

CHAPITRE III.

DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

§ 1er. *Phénomènes généraux.*

876. Lorsqu'on frotte un morceau de verre, de soufre, de résine, un bâton de cire d'Espagne, avec une étoffe de laine, on remarque que ces corps acquièrent la propriété d'attirer les corps légers, tels que des barbes de plume, de petits fragments de papier, des feuilles d'or, etc. La cause de ce phénomène a été désignée sous le nom d'*électricité*, du nom grec de l'ambre (ἤλεκτρον), substance dans laquelle on l'a reconnue pour la première fois.

Thalès (600 ans avant J.-C.) paraît être le premier philosophe qui ait fait connaître cette propriété de l'ambre jaune. Avant le XVIe siècle on ne connaissait point d'autres phénomènes électriques ; mais, depuis, cette partie de la physique, étudiée par un grand nombre de physiciens, s'est enrichie d'une foule de découvertes. Maintenant l'électricité forme une des branches les plus étendues et les plus curieuses de la physique.

877. Les attractions dont nous venons de parler peuvent se manifester à des distances considérables, et ne sont point détruites par l'interposition des corps, de quelque nature qu'ils soient ; c'est ce que l'on peut constater en plaçant des lames de différentes substances entre les corps électrisés et les corps légers. Ces attractions deviennent bien plus énergiques, et se manifestent à une bien plus grande distance, quand on emploie des corps d'une grande surface qu'on frotte très-vivement. On se sert alors de différents appareils

qu'on désigne sous le nom de machines électriques, et que nous décrirons plus tard. Au moyen de ces machines on obtient non-seulement des attractions énergiques, mais les surfaces électrisées deviennent lumineuses dans l'obscurité, elles acquièrent une odeur de phosphore, et, lorsqu'on en approche certains corps, avant le contact, il se manifeste une brillante étincelle.

878. *Inégalité de faculté conductrice des corps.* En général, si on touche avec la main un métal quelconque, un corps humide, etc., un corps électrisé par frottement, il perd la faculté d'attirer les corps légers, et rentre dans l'état primitif; mais si on le touche avec du verre, du soufre, des résines, de la soie, il conserve sa faculté électrique. Pour expliquer ces faits, on a admis que les phénomènes électriques étaient dus à un fluide très-subtil, qui pouvait facilement s'échapper à travers certains corps, et qui se propageait difficilement à travers les autres. Les premiers ont été désignés sous le nom de *bons conducteurs*, les autres sous celui de *mauvais conducteurs*.

Pour reconnaître les différences de faculté conductrice des corps, on peut employer l'appareil suivant. AB (fig. 506) est un support en verre, muni d'un fil de soie très-fin à l'extrémité duquel est suspendue une petite balle de moelle de sureau *m*; *n* (fig. 507) est une boule métallique fixée à l'extrémité d'un cylindre de la substance dont on veut connaître la faculté conductrice. On électrise la boule *n* en la mettant en contact avec un cylindre de verre récemment frotté et en tenant l'appareil par le point *b*; alors on approche la boule de l'extrémité du petit pendule : il est évident que, s'il est dévié de sa direction, le corps *ab* n'a pas laissé passer l'électricité et, par conséquent, qu'il est mauvais conducteur; dans le cas contraire, il conduit l'électricité. A la place du pendule on pourrait employer l'appareil fig. 508, composé d'une aiguille en verre très-mince, mobile autour de son centre, et dont les extrémités sont garnies de balles de sureau. Pour observer la conductibilité des substances liquides ou gazeuses, il faudrait se servir d'un tube de verre AB (fig. 509), terminé par une boule métallique; on remplirait le tube du liquide, du gaz, ou de la vapeur que l'on veut essayer, et on mettrait l'extrémité de la colonne fluide en communication avec la main par un fil métallique.

On a ainsi reconnu que toutes les substances vitreuses, résineuses, la soie, les pierres, les briques, la terre sèche, les gaz secs, et en général toutes les substances qui deviennent immédiatement

électriques par le frottement, étaient de très-mauvais conducteurs; et qu'au contraire les métaux, l'eau, surtout celle qui est chargée de sels, presque tous les liquides, les gaz humides, le charbon calciné, les végétaux, les animaux, la terre humide, sont de bons conducteurs.

On dit qu'un corps est *isolé* lorsqu'il est soutenu par un corps mauvais conducteur. Les corps que l'on emploie le plus fréquemment comme isoloirs sont des cordons de soie, des tubes de verre recouverts de gomme laque, et surtout des cylindres de cette dernière substance.

879. *Distribution de l'électricité entre deux corps en contact.* Lorsque deux corps conducteurs sont isolés, qu'après avoir électrisé l'un d'eux, on les met en communication, et qu'on les sépare ensuite, on reconnaît que l'action du premier corps sur les corps légers qu'on lui présente est d'autant plus diminuée que le second a de plus grandes dimensions. Ainsi quand deux corps isolés, dont un seul est électrisé, sont en contact, l'électricité se partage entre eux, de manière que celui qui n'a pas été électrisé en prend d'autant plus que sa surface est plus grande; de sorte que si elle était très-grande relativement à celle de l'autre, ce dernier ne conserverait pas d'électricité sensible : c'est ce qui arrive lorsqu'un corps électrisé est mis en contact avec le sol, directement ou par l'intermédiaire de corps bons conducteurs. C'est pour cette raison que la terre est souvent désignée sous le nom de *réservoir commun*.

Si deux corps mauvais conducteurs sont mis en contact, l'un étant électrisé, l'autre étant à l'état naturel, ils ne perdent ou n'acquièrent de l'électricité qu'au point de contact.

Quand deux corps sont, l'un bon conducteur et isolé, l'autre mauvais conducteur, et que l'un d'eux, après avoir été électrisé, est mis en contact avec le second, le corps mauvais conducteur n'acquiert ou ne perd de l'électricité qu'au point de sa surface où le contact a lieu, tandis que l'accroissement ou la perte électrique de l'autre se manifeste sur toute l'étendue de sa surface. Lorsqu'un corps conducteur, isolé et électrisé, est mis en contact avec un autre corps, aussi conducteur et isolé, à l'état naturel, de même forme et de même grandeur, l'électricité se partage également entre eux. On peut constater ce fait en présentant successivement les deux corps à la même distance d'un petit pendule : il éprouve par chacun d'eux la même déviation. L'expérience a été faite avec des

boules de sureau et des boules égales des différents métaux, pleines ou creuses, avec des disques de fer et de papier. Ainsi les corps bons conducteurs n'agissent point sur l'électricité par une affinité chimique; il semble que ces corps sont des vases dans lesquels l'électricité se distribue suivant ses propres lois. Nous devons dire cependant que, si la quantité d'électricité partagée était très-faible, on trouverait une différence très-sensible entre les parties qui se répandraient dans les deux corps en contact; ce fait a été démontré par des expériences récentes de Peltier. Il résulte de là que la conductibilité, comme nous le verrons plus tard, n'a rien d'absolu; elle dépend pour chaque corps de la tension de l'électricité. Lorsque cette force est très-grande, relativement à la résistance du corps au mouvement de l'électricité, tous les corps doivent sensiblement se comporter de la même manière; mais, dans le cas contraire, il ne peut plus en être de même.

880. *Tous les corps sont électriques par le frottement.* Les corps que nous avons indiqués comme étant électriques par le frottement, sans être isolés, sont tous mauvais conducteurs, et c'est par cette raison qu'ils conservent le pouvoir électrique. Mais on conçoit que, si un corps conducteur était aussi électrique par le frottement, on ne pourrait pas reconnaître cette propriété en tenant ce corps à la main : car, s'il s'électrisait, l'électricité s'écoulerait à mesure dans le réservoir commun par la main et le corps, qui sont aussi de bons conducteurs; il faudrait nécessairement le tenir avec des gants de soie, ou à l'extrémité d'une tige de verre ou de résine. En opérant ainsi on a reconnu que tous les corps s'électrisaient par le frottement. On peut constater le développement de l'électricité par le frottement des corps solides, au moyen de deux plaques différentes, soutenues par des manches de verre; cependant, lorsque les corps frottés sont tous deux métalliques, il faut employer des appareils d'une plus grande sensibilité pour reconnaître la présence de l'électricité dans chacun d'eux. On constate le développement de l'électricité par le frottement des liquides contre les corps solides, en agitant du mercure dans un vase de verre; le vase se trouve électrisé : par exemple, en faisant monter rapidement le mercure dans la chambre d'un baromètre, le tube devient lumineux dans l'obscurité. On peut reconnaître l'influence du frottement des corps gazeux contre les corps solides en dirigeant le vent d'un soufflet contre une vitre : cette dernière devient électrique. Quant à l'effet du frottement des liquides et des gaz entre eux, on n'a fait

aucune expérience; mais il est très-probable qu'ils doivent aussi s'électriser : ainsi nous admettrons que tous les corps isolés par des corps non conducteurs s'électrisent par le frottement.

881. *Les électricités qui se développent dans deux corps isolés frottés l'un contre l'autre sont de nature différente dans chacun d'eux. Les corps chargés d'électricité de même nature se repoussent, et ceux qui sont chargés d'électricité de nature différente s'attirent.* Lorsque deux corps isolés ont été frottés l'un contre l'autre, si on les approche séparément du petit pendule AB (fig. 508), ou de l'aiguille horizontale (fig. 508), chacun attire les balles de sureau. Mais si on touche la boule du pendule avec un des corps, de manière qu'elle partage son électricité, elle sera repoussée par ce corps et attirée par l'autre. On peut faire cette expérience au moyen de deux petits pendules (fig. 510), dont les supports AB et CD sont non conducteurs, et dont les boules de sureau *a* et *b* sont suspendues à des fils conducteurs communiquant à deux tiges métalliques, terminées par des boutons *m* et *n* : si l'on met le même corps électrisé en contact avec les boutons *m* et *n*, les balles *a* et *b* se repoussent, et si on met un des corps frottés en contact avec le bouton *m* et l'autre avec le bouton *n*, les deux balles s'attirent. On constate encore la répulsion qui existe entre deux corps électrisés de la même manière, au moyen du pendule double (fig. 511), dont les boules sont suspendues par un corps conducteur : en touchant avec un corps électrisé le bouton *m*, les deux balles entre lesquelles se partage l'électricité reçue se repoussent (fig. 512). Cette répulsion se manifeste en approchant seulement le corps électrisé de *m* ou des balles de sureau, parce que les balles sont alors électrisées par une influence à distance, dont il sera bientôt question.

882. Les électricités mises en liberté sur les deux corps frottés sont en proportions telles qu'elles peuvent se neutraliser complétement; on peut facilement vérifier ce fait au moyen de deux disques isolés et frottés (fig. 513) : si on les approche à la même distance, et dans deux directions opposées, d'un petit pendule, il reste en équilibre entre eux; et si on les met en contact, tout signe d'électricité disparaît.

883. Ces deux espèces d'électricité qui se développent dans les corps sont fournies par le verre et la résine frottés avec des étoffes de laine : c'est pourquoi l'une a été désignée sous le nom d'*électricité vitrée*, et l'autre d'*électricité résineuse*. Mais comme le verre ne

prend pas toujours la même espèce d'électricité, même quand il est frotté avec le même corps, nous emploierons de préférence les désignations d'*électricité positive* et d'*électricité négative*, attendu que ces deux espèces d'électricité jouissent de propriétés opposées, comme les expériences précédentes le démontrent.

On fait ordinairement une expérience assez curieuse, fondée sur la double électrisation produite par le frottement. Deux personnes montent chacune sur un tabouret à pieds de verre; une d'elles frotte les habits de l'autre avec une peau de chat : après une légère friction, toutes deux sont électrisées, la première positivement, la seconde négativement, et toutes deux donnent des étincelles, lorsqu'on en approche le doigt à une petite distance.

884. L'espèce d'électricité que prend un corps par le frottement avec un autre dépend de la nature des deux corps, de la température, de l'état des surfaces, jamais de la vitesse ou de la pression, à moins que dans les variations de vitesse ou de pression il n'y ait beaucoup de chaleur dégagée. Le frottement de glissement produit aussi le même effet que le frottement de roulement, pourvu qu'il n'existe pas d'adhérence entre les deux corps. Nous reviendrons plus tard sur l'influence de ces différentes circonstances, en parlant des causes du développement de l'électricité.

885. *Les attractions et les répulsions électriques suivent la loi de la raison inverse du carré des distances.* C'est à Coulomb que l'on doit la découverte de cette loi importante. L'ingénieux appareil qu'il a employé est fondé sur un principe que nous avons déjà fait connaître [123], mais que nous devons rappeler. Si un fil métallique AB (fig. 514), suspendu par une de ses extrémités, supporte par l'autre un levier horizontal CD, en faisant tourner le levier dans son plan, le fil se tordra, et le levier, abandonné à lui-même, reviendra, en vertu de l'élasticité du fil, à sa position initiale autour de laquelle il oscillera pendant un certain temps et à laquelle il finira par s'arrêter. Coulomb a reconnu, par des expériences nombreuses, que, si la torsion ne changeait pas la contexture du fil, la force avec laquelle le fil tendait à se détordre, et, par conséquent, la force qu'il fallait employer pour l'empêcher de produire cet effet, était proportionnelle à l'angle de torsion, c'est-à-dire à l'angle formé par la direction C'D' du levier avec sa première position CD.

L'appareil en question, que l'on désigne sous le nom de balance de Coulomb, est composé (fig. 515) d'un cylindre de verre ABCD d'environ 30 centimètres de diamètre, fermé par un plateau de

verre AC, percé à son centre d'une ouverture circulaire sur laquelle est mastiqué un autre cylindre de verre EF d'un plus petit diamètre et d'une plus grande hauteur; à l'extrémité supérieure du cylindre EF se trouve une boîte en cuivre qui l'enveloppe et peut tourner librement autour de lui; cette boîte est fermée supérieurement par une plaque métallique sur laquelle se trouve un cadran divisé en 360 parties égales; le centre de la plaque est percé d'une ouverture dans laquelle s'engage à frottement libre un cylindre de cuivre, qui sert d'axe à l'aiguille *ab* et qui est terminé supérieurement par un bouton destiné à le faire mouvoir. L'axe de l'aiguille porte inférieurement une pince que l'on serre au moyen d'un anneau. Cette partie de l'appareil porte le nom de *micromètre*. (La fig. 516 présente la coupe du micromètre et sa projection horizontale sur une plus grande échelle.) Un fil métallique très-fin *mn*, fixé supérieurement à la pince de l'axe de l'aiguille, supporte à sa partie inférieure une petite masse métallique, à travers laquelle s'engage un fil de gomme laque *cd*, dont une des extrémités est armée d'une petite boule de moelle de sureau, et l'autre d'un disque de papier doré qui lui fait équilibre. Le plateau AC est percé d'une autre ouverture O par laquelle on introduit une tige isolante, à l'extrémité de laquelle se trouve une petite boule *d'*; le cylindre ABDC est revêtu extérieurement, à la hauteur du levier *cd*, d'une bande de papier divisée en 360 parties égales. Le mouvement de la boîte du micromètre sert à amener le levier *cd* sur le zéro de la division de la cage ABDC, en laissant l'aiguille sur le zéro de sa division.

Pour trouver la loi des répulsions électriques, Coulomb plaça l'aiguille du micromètre sur le zéro de la division, et fit tourner la boîte jusqu'à ce que la boule *d*, dans sa position d'équilibre, touchât la boule *d'*, qui se trouvait en face du zéro de la division de la cage; ensuite il enleva de la cage la boule *d'*, lui donna une faible tension électrique et la remit en place : la boule *d*, en touchant la boule *d'*, partagea son électricité avec elle et fut repoussée; le levier *cd* resta en équilibre, lorsque la distance fut telle que la force répulsive fît équilibre à la force de torsion. Dans une série d'expériences, l'angle du levier, avec sa première position mesurée sur la division du cylindre ABDC, était de 36°; en faisant mouvoir l'aiguille du micromètre de manière à faire rapprocher les boules, Coulomb reconnut que, pour diminuer de moitié leur distance, il fallait faire marcher l'aiguille de 126°, et pour que la distance des boules ne fût plus que le quart de ce qu'elle était d'abord,

il fallait faire tourner la même aiguille de 567°. Il est évident que, dans ces deux dernières positions d'équilibre, la torsion du fil était égale à l'écart des deux boules, plus à l'angle décrit en sens contraire par le micromètre. Ainsi, dans ces trois opérations, les torsions étaient 36°, 18+126 et 9+567, ou bien 36, 144 et 576; or, ces nombres sont entre eux comme 1, 4, 16; et comme les distances étaient 1, 1/2, 1/4, il en résulte évidemment la loi énoncée. Dans ces expériences, il y a cependant trois causes d'erreur : la première consiste en ce que la distance réelle des boules n'est pas mesurée par l'arc qui les sépare, mais par sa corde; la seconde résulte de ce que, la force répulsive ne s'exerçant pas perpendiculairement au levier CD, une portion de cette force est détruite par l'obliquité du levier; la troisième consiste en ce que les corps chargés d'électricité en perdent continuellement par le contact de l'air, et que, par conséquent, la force répulsive doit diminuer pendant la durée des expériences. Les deux premières erreurs peuvent facilement se calculer, et en les introduisant dans les données des expériences citées, on trouve encore l'accord le plus satisfaisant avec la loi en question. Quant à la dernière, elle était très-petite le jour où furent faites les expériences, car les deux boules, repoussées à une distance de 30°, ne se sont rapprochés que d'un demi-degré en 2 minutes.

Soient B (fig. 517) la boule fixe, AC l'aiguille mobile. La force répulsive agit suivant BC. Pour la comparer à la force de torsion, il faut la décomposer en deux autres : l'une agissant suivant la tangente CT, l'autre dans la direction AC; on aura seulement à tenir compte de la première. En désignant par f la force agissant suivant BC, et par f' la force agissant suivant CT, par a l'angle BAC, on aura évidemment

$$f' = f \cos \frac{a}{2}.$$

En désignant par b le coefficient de torsion, par m l'angle de torsion, AC par l, l'attraction à l'unité de distance par f, et en admettant que la force suive la raison inverse du carré de la distance, on aura

$$mb = \frac{f \cos \frac{a}{2}}{BC^2} = \frac{f \cos \frac{a}{2}}{4l^2 \sin^2 \frac{a}{2}}; \quad \text{d'où } \frac{f}{4l^2 b} = m \left(\sin \frac{a}{2} \operatorname{tang} \frac{a}{2} \right).$$

Le premier membre de cette dernière équation étant constant, le second doit l'être également, quel que soit a. Ainsi, pour vérifier la loi en question, il suffit de reconnaître que le produit $m \left(\sin \frac{a}{2} \operatorname{tang} \frac{a}{2} \right)$ ne change pas avec m et a.

886. Les attractions électriques suivent la même loi que les répulsions : on peut le vérifier au moyen du même appareil; mais ces expériences exigent quelques précautions. Coulomb commençait par tendre verticalement, dans la cage ABDC (fig. 515), un fil qui empêchait la boule *d* de toucher la boule fixe, et après avoir mis le levier *cd* en contact sans torsion avec le fil, il donnait une certaine tension électrique à la boule *d'*, il tournait l'aiguille du micromètre de manière à éloigner le bras de levier *cd* du fil d'arrêt, et il observait les torsions correspondantes à des distances 1, 2, 4, etc. Coulomb trouva ainsi que les attractions suivaient exactement la loi des répulsions. Ces expériences démontrent l'exactitude de la loi, lorsqu'un corps électrisé agit sur un corps à l'état naturel; elles démontrent également que la même loi se manifesterait, si les corps étaient chargés d'électricité de nature contraire : car nous verrons plus tard que l'action d'un corps électrisé sur un autre à l'état naturel repose sur un développement d'électricité par influence.

Pour concevoir la nécessité de la nouvelle disposition dont il s'agit, supposons que, la boule *d* étant dans l'état naturel et en repos, on lui présente à une certaine distance la boule *d'* électrisée : la première se mettra en mouvement vers la seconde, et à mesure que leur distance diminuera, l'attraction augmentera en même temps que la force de torsion. Mais pour savoir si, avant le contact, il existera une position d'équilibre stable, il faut examiner la nature des deux forces qui varient. Soient AB (fig. 518) la distance des deux boules, A la position de la boule mobile; si nous représentons l'attraction à une distance quelconque A'B par la perpendiculaire A'*m*, il est évident que les attractions, croissant en raison inverse du carré de la distance, seront représentées par les ordonnées de l'hyperbole équilatère XY, ayant pour asymptotes AB et BC, AX étant l'intensité de l'attraction à la distance AB. La force de torsion pouvant être considérée comme croissant proportionnellement à la distance rectiligne des deux boules, quand les écarts sont très-petits, cette force sera représentée par les ordonnées d'une droite passant par le point A, et la tangente de l'angle de cette droite avec AB sera proportionnelle à l'intensité de la force de torsion. A l'inspection de la figure, on voit que l'existence d'une position d'équilibre stable dépend de l'inclinaison de la droite AM sur AB : car si la droite ne coupe pas la courbe XY, il est évident qu'à aucune distance la force de torsion ne pourra égaler l'attraction; mais si cette droite coupe la courbe aux points *m* et *n*, il est évident qu'à la distance A' B il y aura un équilibre stable, et à la distance A'' B un équilibre instantané. Ainsi, en prenant des fils dont la force de torsion soit très-grande relativement à l'attraction des deux boules, et en plaçant la boule *d* à une certaine distance angulaire de la boule *d'*, il existera toujours une position d'équilibre stable que l'on pourra observer; et en faisant mouvoir l'aiguille du micromètre de manière à faire rapprocher les

boules, on aurait, comme dans les expériences de la répulsion, une série de positions d'équilibre dont on comparerait les distances et les torsions; mais comme il est indispensable, pour conserver à l'appareil toute sa sensibilité, d'avoir des fils dont la force de torsion soit très-faible, et que, d'ailleurs, la grande mobilité du levier produit souvent de grandes oscillations, la boule mobile pourrait toucher la boule fixe, ce qui changerait l'attraction en répulsion : il vaut mieux alors employer le procédé suivi par Coulomb.

887. Coulomb a encore vérifié la loi que suivent les attractions et les répulsions électriques, par un procédé différent qu'il est bon de connaître. Il remplaçait le fil métallique de suspension par un fil de soie tel qu'il sort du cocon (la force de torsion était tellement petite, que celle d'une circonférence équivalait au poids d'un cent-vingt-millième de grain); à l'extrémité du levier en gomme laque, il plaçait un petit cercle vertical de papier doré, et à une certaine distance il disposait un globe métallique isolé à l'état naturel, ou chargé d'électricité de nature différente de celle du disque : le levier oscillait horizontalement par l'attraction du globe, comme un pendule ordinaire oscille verticalement par la pesanteur. Comme les amplitudes des oscillations étaient fort petites, que l'aiguille était très-courte et éloignée du centre du globe d'une quantité fort considérable comparativement à sa longueur, il en résultait que les lignes menées de différents points du disque de papier au centre du globe, dans ses différentes positions pendant une même oscillation, pouvaient être considérées comme égales et parallèles. Or on trouve par le calcul qu'en supposant que l'attraction varie en raison inverse du carré de la distance, la durée des oscillations devait croître proportionnellement à la distance. Coulomb trouva, en effet, que les nombres d'oscillations dans le même temps étaient en raison inverse des distances.

En effet, la formule

$$T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

que nous avons donnée [58], est ici exactement applicable; seulement il faut y remplacer g par $\frac{F}{D^2}$, F étant l'intensité de l'attraction à l'unité de distance, et D la distance du disque doré au centre du globe électrisé. La formule devient alors

$$T = D\pi\sqrt{\frac{l}{F}}.$$

La même méthode pourrait également servir pour déterminer la

loi des répulsions, car en communiquant au globe et à la plaque des électricités de même nature, l'aiguille serait repoussée et oscillerait en vertu de cette répulsion dans une position diamétralement opposée à la première.

888. *Les forces attractives ou répulsives des corps électrisés sont proportionnelles aux produits des quantités d'électricités libres renfermées dans ces corps.* Pour constater cette loi, dont la découverte est encore due à Coulomb, on procède de la manière suivante. Une balle de sureau égale à celle qui est fixée à l'extrémité du levier de la balance, est électrisée, puis introduite dans la cage; après le contact les boules se repoussent, et on mesure la torsion à l'instant de l'équilibre; ensuite, après avoir touché une des boules pour la remettre à l'état naturel, on répète l'expérience, et l'on mesure la torsion correspondante à l'équilibre à la même distance que dans la première opération. La torsion est quatre fois plus petite dans ce dernier cas que dans le premier; ce qui est d'accord avec la loi que nous avons énoncée : car en représentant par a la quantité d'électricité donnée d'abord à la boule, après le partage avec celle de la balance, chacune renfermait une quantité d'électricité égale à $\frac{a}{2}$, et d'après la loi énoncée, leur force répulsive était proportionnelle à $\frac{a^2}{4}$; et, dans le second cas, après le nouveau partage chacune possédait une quantité d'électricité égale à $\frac{a}{4}$, et la force répulsive était proportionnelle à $\frac{a^2}{16}$. On voit, d'après cela, que les attractions et les répulsions des corps électrisés sont les mêmes que si ces actions provenaient de molécules étrangères dont la présence dans ces corps serait la cause de leur faculté électrique.

Il résulte aussi de ce qui précède, que la quantité d'électricité libre que possède un corps est proportionnelle à la racine carrée de la torsion qui mesure, dans la balance de Coulomb, sa répulsion à la même distance par un corps de même dimension avec lequel il a partagé son électricité. Il en serait encore de même, si les corps entre lesquels s'exerce la répulsion avaient des dimensions différentes, parce que le partage de l'électricité aurait lieu dans un rapport constant, et, par conséquent, le produit des quantités d'é-

lectricité renfermées dans les deux corps serait égal à un nombre constant, multiplié par le carré de la quantité d'électricité de l'un d'eux.

889. *L'électricité dans un corps conducteur réside entièrement à sa surface.* Ce fait résulte nécessairement des expériences suivantes. Si l'on électrise une sphère creuse (fig. 519), percée d'une ouverture circulaire, et qu'on introduise dans son intérieur un petit disque de papier doré *m*, supporté par un manche de gomme laque, de manière qu'il touche la surface concave, le disque après sa sortie n'est pas électrisé, si l'on a eu soin d'éviter qu'il touche les bords de l'orifice en entrant et en sortant. Si l'on électrise une sphère métallique suspendue à un fil de soie (fig. 520), et si on l'enveloppe avec deux hémisphères également métalliques, soutenus par des manches isolants, en les enlevant rapidement, la sphère perd toute son électricité.

890. *L'électricité est retenue à la surface des corps par l'air environnant.* En effet, lorsqu'on place sous le récipient d'une machine pneumatique un corps isolé et électrisé, si l'on fait le vide, toute l'électricité du corps se dissipe. Cependant un corps mauvais conducteur conserve encore, dans les mêmes circonstances, une certaine quantité d'électricité.

891. *Lorsqu'un corps conducteur isolé est garni d'une pointe métallique, l'électricité dont on le charge s'écoule par la pointe.* Ce fait résulte de ce qu'un corps conducteur isolé, armé d'une pointe, ne peut pas être électrisé par le contact avec un tube de verre chargé d'électricité par le frottement, et de ce qu'il fait disparaître l'électricité d'un corps conducteur isolé, chargé d'électricité, avec lequel il est mis en contact.

892. Quand un corps conducteur isolé et terminé par une pointe, peut se mouvoir facilement en sens contraire de l'écoulement de l'électricité par la pointe, le mouvement a toujours lieu. La manière la plus simple de faire cette expérience consiste à prendre un fil métallique terminé par deux pointes, recourbées à angle droit, dans le même plan et en sens contraires, et garnie à son milieu d'une chape, que l'on place sur une pointe isolée, communiquant avec une source quelconque d'électricité : l'aiguille tourne d'une manière continue, tant que la source fournit de l'électricité au support. Ce phénomène, tout à fait analogue à ceux que présente l'écoulement des liquides et des gaz, s'expliquait en admettant que l'électricité libre à la surface d'un corps

exerce sur l'air une certaine pression, que dans l'état d'équilibre toutes ces pressions se détruisent, mais qu'aussitôt que l'électricité s'écoule par un point, la résultante des pressions exercées sur tous les autres s'obtient tout son effet. Nous reviendrons plus tard sur ce phénomène, qui paraît dépendre d'une tout autre cause.

893. *Développement de l'électricité par influence.* Soit A (fig. 521) un corps conducteur isolé, et B un autre corps conducteur également isolé, et garni dans toute sa longueur de fils doubles portant à leurs extrémités de petites boules de moelle de sureau. Si l'on électrise le corps A, et si on le place à une petite distance d'une des extrémités du corps B, on observe les phénomènes suivants. 1° Les boules de sureau s'écartent, et la divergence décroît des extrémités au centre : par conséquent, le cylindre B est électrisé et l'électricité libre en chaque point augmente du centre aux extrémités. 2° Les électricités développées dans les deux moitiés du cylindre sont de nature différente : celle qui existe dans la partie la plus voisine de A est de nature contraire à celle de B, et celle qui se trouve sur la partie la plus éloignée est de même nature. 3° En rapprochant davantage le corps A du cylindre B, la divergence des boules augmente, et elle diminue si on l'éloigne ; mais le point d'indifférence, qui ne coïncide jamais avec le milieu de B, s'en approche d'autant plus que le corps A est plus éloigné. En touchant le corps A avec le doigt, tout indice d'électricité disparaît dans A et B. 4° Lorsque le corps B est électrisé par influence, qu'on le touche en *n* avec un corps conducteur d'une petite dimension et isolé, et qu'on éloigne le corps A, ou qu'on dissipe son électricité en le touchant avec le doigt ou avec un corps bon conducteur communiquant avec le sol, on trouve le corps B chargé de l'espèce d'électricité qui se trouvait en *m*. De même, si on avait touché le corps B en *m* après l'éloignement de A, le corps B se trouverait chargé de l'espèce d'électricité qui existait en *n*; mais si on touche le corps B en *m* ou en *n*, avec un corps conducteur communiquant avec le sol, le corps B, après l'éloignement de A, reste chargé de l'espèce d'électricité contraire à celle qui se trouve dans A. 5° Enfin, si on touche le corps A aux points *r* et *s* avec un corps conducteur de petite dimension et isolé, tel qu'une boule de moelle de sureau soutenue par un cylindre de verre ou de gomme laque, on trouve que, quand le corps A n'agit pas sur B, le petit conducteur prend la même charge électrique aux points *r* et *s*, et que, dans le cas contraire, il prend au point *r* une charge plus

grande qu'au point *s;* la différence est d'autant plus grande que les corps A et B sont plus voisins. Les corps mauvais conducteurs ne se comportent pas de la même manière : ils s'électrisent difficilement par influence; mais quand ils l'ont été, ils conservent l'état électrique qu'ils ont acquis, lorsqu'ils sont soustraits à l'influence de la cause qui l'a produit.

894. *Hypothèses admises pour expliquer les phénomènes électriques.* Pour expliquer les phénomènes que nous venons d'exposer, on a admis 1° qu'ils proviennent de deux fluides très-subtils, dont les molécules similaires se repoussent, et celles de nature différente s'attirent; 2° que tous les corps renferment, à l'état de combinaison, ces deux fluides qui peuvent alors manifester leur présence ; 3° que ces fluides sont séparés par le frottement, et se portent l'un dans un des corps, l'autre dans le second; 4° que les corps sont plus ou moins bons conducteurs. Ces hypothèses, comme nous allons le faire voir, satisfont complétement aux faits observés.

895. *Explication des phénomènes électriques dans l'hypothèse des deux fluides.* Lorsqu'on frotte deux corps, le fluide neutre qu'ils contiennent est en partie décomposé, et l'un des corps prend le fluide positif, l'autre le fluide négatif; mais un des corps ne peut conserver l'électricité dont il s'est emparé qu'autant qu'il est mauvais conducteur ou isolé. Quand un corps bon conducteur est chargé d'électricité, les molécules électriques, étant douées d'une force répulsive, s'éloignent les unes des autres jusqu'à ce qu'elles rencontrent un obstacle : alors elles s'accumulent à la surface même du corps, où l'air, par son défaut de conductibilité, s'oppose à leur écoulement.

Poisson, en partant de ce principe que les attractions et les répulsions électriques ont lieu en raison inverse du carré de la distance, et que, dans un corps à la surface duquel l'électricité est en équilibre, l'action totale de la couche électrique sur un point quelconque de l'intérieur du corps doit être nulle, afin qu'aucune nouvelle portion d'électricité ne soit développée, est parvenu à des formules qui représentent la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs. Il résulte de ces formules que l'électricité libre forme à la surface du corps une couche extrêmement mince, d'une densité constante, dont l'épaisseur, proportionnelle en un même point à la quantité d'électricité que renferme le corps, varie en général d'un point à un autre suivant une loi qui dépend des rayons de courbure de la surface, de telle manière qu'elle est

plus grande dans les points de la surface où les rayons de courbure sont les plus petits, et que, si la surface était garnie d'une pointe, à son extrémité, l'épaisseur de la couche y serait infinie. Mais cette couche électrique appuyée contre l'air qui environne le corps, exerce nécessairement sur lui une certaine pression; le calcul démontre que cette pression, désignée sous le nom de *tension*, varie en chaque point, proportionnellement au carré de l'épaisseur de la couche électrique; et en outre que la résultante totale de ces pressions est nulle, ou, en d'autres termes, que dans une direction donnée il y a toujours deux pressions égales et opposées qui se détruisent; de sorte que, quand l'électricité est en équilibre, ces pressions ne peuvent imprimer aucun mouvement au corps. Mais si le corps renferme une pointe, la pression exercée à son extrémité est toujours suffisante pour vaincre la résistance de l'air : alors l'électricité s'écoule, et la pression opposée à la direction de l'écoulement obtient son effet, si le corps n'oppose pas une trop grande résistance au mouvement. Nous ajouterons que les tensions observées sur les différents points d'un corps s'accordent parfaitement avec celles qui résultent du calcul.

Les circonstances qui accompagnent le développement de l'électricité par influence s'expliquent aussi facilement dans l'hypothèse admise. En effet, lorsque le corps A (fig. 521) électrisé, par exemple positivement, est placé à une petite distance du cylindre B conducteur et isolé, l'électricité de A décompose le fluide neutre de B, attire dans la partie la plus voisine l'électricité négative et refoule dans la partie la plus éloignée l'électricité positive. La tension devra être plus grande en *m* qu'en *n*, et comme le corps B renferme la même quantité d'électricité positive et négative, la ligne neutre devra évidemment être plus voisine de *m* que de *n*, et d'autant plus que le corps A sera plus près; la quantité d'électricité mise en liberté devra nécessairement diminuer à mesure qu'on éloignera davantage les deux corps. On conçoit facilement que, si on touche le corps B en un point quelconque avec un corps conducteur isolé, quand on aura éloigné le corps A, et que les deux fluides qui ont été séparés par influence se combineront, il manquera pour former du fluide neutre toute l'électricité qu'on a enlevée; par conséquent, le corps B conservera une quantité d'électricité libre, égale et opposée à celle qui a été enlevée. Enfin, si l'on touche le corps B en un point quelconque avec un corps conducteur communiquant avec le sol, lorsqu'il est soumis à l'influence du corps A, après l'éloignement ou

la neutralisation de l'électricité de A, B reste chargé d'électricité contraire; si le contact a lieu au point *n*, la chose est évidente; mais si la communication avec le sol est établie au point *m*, c'est encore le fluide positif qui s'écoule, car le corps qui établit la communication éprouve par influence la même décomposition que B, mais la décomposition est plus complète, attendu que son électricité positive s'écoule dans le sol, tandis qu'elle s'accumule à l'extrémité *n* de B et diminue par son influence la quantité d'électricité neutre qui serait décomposée sans cette circonstance : alors une partie du fluide négatif du conducteur pénètre dans le corps B, neutralise l'électricité positive accumulée en *n*, et, après la suppression du conducteur, le corps B reste chargé négativement. Quant aux variations de tension que le corps A éprouve dans les parties les plus voisines et les plus éloignées de B, quand on augmente ou quand on diminue la distance des deux corps, elle provient évidemment de l'attraction exercée par l'électricité de B sur celle de A, dont l'effet est d'attirer cette dernière électricité dans la partie du corps la plus voisine de B, et d'autant plus que la distance est plus petite.

896. Nous pouvons maintenant expliquer les attractions et les répulsions des corps électrisés. Supposons deux corps de forme sphérique A et B. Il peut se présenter un grand nombre de cas, suivant que l'un ou l'autre, ou tous deux, sont bons ou mauvais conducteurs, et suivant l'espèce d'électricité dont ils sont chargés : nous n'examinerons qu'un petit nombre de ces cas; l'explication des autres s'en déduira facilement. Admettons d'abord que les deux corps soient mauvais conducteurs et chargés d'électricités différentes ; les couches électriques étant retenues à leur surface par la force inconnue qui empêche la conductibilité, ainsi que par la résistance de l'air, et ayant la propriété de s'attirer, elles entraîneront nécessairement dans leur mouvement les masses auxquelles elles sont adhérentes, pourvu que le poids de ces masses ou toute autre résistance ne s'y oppose; et, pendant le rapprochement, chacun des corps conservera sensiblement le même état électrique.

Si A et B sont tous deux bons conducteurs chargés d'électricités différentes, les deux couches électriques qui recouvrent leurs surfaces n'y sont maintenues que par la résistance de l'air : par conséquent, ces corps ne participeront aux mouvements que tendent à prendre leurs couches électriques qu'autant que leurs résistances seront plus faibles que celles que peuvent vaincre les attrac-

tions, et qu'en outre la pression exercée sur l'air par ces couches soit plus petite que sa résistance, car autrement les électricités abandonneraient les deux corps pour se combiner. Dans le cas dont il s'agit, à mesure que les sphères A et B se rapprochent, les épaisseurs des couches électriques augmentent dans les points les plus voisins, non-seulement par l'électricité libre que les corps possédaient d'abord et qui s'accumule dans les points les plus voisins, mais encore par une décomposition croissante d'électricité naturelle dans le corps qui contient le moins d'électricité libre : alors, à une certaine distance, dépendant des épaisseurs initiales de ces couches, les électricités abandonnent toujours les deux corps.

Si, les deux corps étant bons conducteurs, un seul se trouvait électrisé, ce dernier opérerait à distance la décomposition du fluide naturel de l'autre, dont la surface serait alors recouverte de deux couches électriques de natures différentes, partant d'un cercle commun perpendiculaire à la ligne qui joint les centres des deux sphères, où l'épaisseur commune serait nulle et de là irait en croissant jusqu'aux points placés sur la ligne des centres. L'attraction apparente des deux corps résulterait de l'attraction de l'électricité de A sur la couche électrique de B la plus voisine, et qui serait de nature contraire, diminuée de la répulsion exercée par l'électricité de A sur l'électricité de même nom développée par influence dans B et refoulée dans la partie la plus éloignée.

Enfin, si un des corps seulement était bon conducteur et électrisé, l'autre étant à l'état naturel, l'attraction serait lente à se développer, et d'autant plus que le dernier corps serait plus mauvais conducteur, parce que la séparation des électricités par influence à distance ne s'y ferait que très-difficilement. C'est ce qu'il est très-facile de vérifier en présentant un corps électrisé à une boule de gomme laque suspendue à l'extrémité d'un fil : l'attraction ne se manifeste qu'au bout d'un certain temps.

La répulsion de deux corps bons conducteurs présente un phénomène singulier dont l'explication se déduit facilement de ce qui précède. Si deux corps chargés de la même espèce d'électricité sont forcés à se rapprocher, il arrive toujours, lorsqu'un des corps est très-petit relativement à l'autre, qu'à une certaine distance la répulsion se change en attraction. La cause de ce changement réside dans le développement de l'électricité par influence : car l'électricité de nature contraire à celle qui existe dans le corps le plus volumineux, et qui se développe dans le plus petit, croissant à mesure

que la distance diminue, il doit nécessairement exister une distance à laquelle cette attraction est plus grande que la répulsion provenant de la couche électrique qui existait d'abord, jointe à celle de même espèce qui a été produite par influence, mais qui est refoulée dans la partie du corps la plus éloignée.

897. Il résulte de ce qui précède que toutes les attractions et répulsions apparentes des corps par l'influence électrique sont uniquement le résultat des attractions et des répulsions des couches électriques qui existent ou se développent à leur surface. Les corps participent à ces mouvements, parce que les couches électriques sont maintenues à leurs surfaces, ou par l'adhérence et par la résistance de l'air s'ils sont mauvais conducteurs, ou par la résistance de l'air seulement s'ils sont bons conducteurs.

Quant aux explosions électriques, elles ont toujours lieu entre deux corps électrisés d'une manière différente, ou directement ou par l'influence de l'un d'eux, lorsque, par la diminution de distance qui les sépare, les tensions sur les points voisins deviennent assez puissantes pour vaincre la résistance de l'air : alors les électricités traversent l'air pour se réunir et former du fluide neutre. Ce phénomène est accompagné de chaleur et de lumière, et quand il a lieu à travers nos organes, d'une sensation pénible plus ou moins vive, qui se fait sentir principalement dans les articulations. Nous examinerons plus tard les circonstances qui accompagnent l'explosion. Quant à l'influence de l'électricité sur nos organes, nos connaissances se réduisent au fait que nous venons de citer.

Dans l'explication que nous venons de donner des phénomènes électriques, nous avons dit que les tensions observées sur les différents points d'un corps s'accordaient parfaitement avec les tensions calculées; nous devons exposer maintenant la méthode qui a été employée pour faire ces expériences et les principaux résultats du calcul et de l'observation. Mais comme les expériences exigent toujours un certain temps, et que l'électricité dont un corps est chargé se dissipe continuellement, il faut nécessairement corriger les résultats obtenus successivement sur différents points, de manière à les ramener à ce qu'ils auraient été, si les expériences eussent été simultanées. Ainsi, nous nous occuperons d'abord des différentes causes de la déperdition de l'électricité.

898. *Causes de la déperdition de l'électricité.* Lorsqu'un corps conducteur isolé est chargé d'électricité, sa tension électrique diminue continuellement et finit par s'anéantir au bout d'un certain

temps. Les causes de cette déperdition et les lois de leur influence sont importantes à connaître, afin de les éviter, quand cela est possible, et, dans le cas contraire, de corriger les résultats que l'on obtient dans toutes les expériences qui exigent une certaine durée. Par exemple, dans les expériences par lesquelles Coulomb détermina la loi des répulsions électriques, si la perte de l'électricité avait été sensible dans l'intervalle des trois observations, les résultats n'auraient pu être comparés entre eux, qu'après que les tensions correspondantes aux deux dernières auraient été ramenées par le calcul à ce qu'elles eussent été si la tension n'avait pas diminué.

Les causes de déperdition de l'électricité dans un corps conducteur isolé sont : 1° l'humidité que l'air dépose sur les corps isolants, et qui les rend conducteurs ; 2° la conductibilité plus ou moins grande des supports, car il paraît qu'il n'existe pas dans la nature de corps parfaitement isolant ; 3° le contact de l'air, car dans l'air parfaitement desséché par du chlorure de calcium ou de l'acide sulfurique concentré, l'électricité se dissipe, quoique beaucoup plus lentement que dans l'air renfermant de la vapeur d'eau. La première cause de déperdition peut facilement être évitée en essuyant et desséchant les corps non conducteurs, et opérant dans une atmosphère qui ne soit pas saturée d'humidité ; mais il n'en est pas de même des deux dernières : il faut, par conséquent, en déterminer les lois.

899. *Loi de la déperdition de l'électricité par la seule influence de l'air.* Pour déterminer la loi dont il est question, il fallait d'abord un support qui isolât parfaitement le corps électrisé, afin de le soustraire à toute influence étrangère à celle de l'air. Coulomb, après de nombreux essais, reconnut qu'un cylindre de cire d'Espagne ou de gomme laque d'une demi-ligne de diamètre et de dix-huit à vingt lignes de longueur suffit pour isoler une balle de sureau qui a cinq à six lignes de diamètre, surtout lorsque la tension électrique n'est pas considérable. D'après cela, Coulomb fixa, dans sa balance, une balle de sureau à l'extrémité d'un levier en gomme laque, et il plaça dans la cage ABCD, par l'ouverture O (fig. 515), une autre boule de sureau, isolée de la même manière au moyen d'un cylindre de gomme laque ; cette dernière fut faiblement électrisée, et les deux boules s'étant partagé cette électricité, celle de la balance fut repoussée. Dans une des séries d'expériences, la première répulsion avait été de 40°, et leur distance fut ramenée à 20° en tournant l'aiguille du micromètre de 140° : la

force de torsion était alors de 160°. A mesure que la déperdition avait lieu, les deux boules se rapprochaient; mais, pour estimer la perte de réaction au bout d'un certain temps, on diminuait la torsion de manière à ramener les boules à leur distance initiale. Il est évident que la perte était alors mesurée par le mouvement rétrograde que l'on avait imprimé à l'aiguille. Ainsi, dans l'expérience citée, au bout de trois minutes il avait fallu détordre le fil de 30°, et la torsion totale ne se trouvait plus que de 130°. Coulomb déterminait ensuite, au moyen des résultats de ces expériences, la perte d'électricité rapportée à la réaction moyenne entre deux observations consécutives : par exemple, dans les observations précédentes, les réactions successives étant 160° et 130°, dont la moyenne est 145° et la perte 30° pour trois minutes, la perte pour une minute, relativement à la tension moyenne, était 10/145.

A la suite d'un grand nombre d'expériences, Coulomb a reconnu les lois suivantes.

1°. La déperdition de l'électricité par le contact de l'air, dans les mêmes circonstances, produit à chaque instant une diminution dans la force de réaction, qui est une même fraction de la réaction du corps au commencement de cet instant, et dans un petit intervalle, une même fraction de la réaction moyenne au commencement et à la fin. La même loi est applicable aux tensions d'un même corps, puisque les tensions sont, comme les réactions, proportionnelles aux carrés des épaisseurs des couches électriques [888].

Au moyen de cette loi, qui est la même que celle de Newton pour le refroidissement [521], on peut calculer la réaction A_t, après le temps t, quand on connaît la réaction A_0 à l'origine : la formule est alors la même que celle de la page 425 du 1er volume :

$$\log A_t = \log A_0 - \frac{a}{M}t \ldots. \ (a),$$

a étant un coefficient dépendant de l'état hygrométrique de l'air, qui devra être déterminé pour chaque série d'expériences par des observations préliminaires, et dont on substituerait les résultats dans la formule; M est toujours le module des tables ordinaires, 2,302585.

Dans l'équation précédente nous avons représenté par A_0 et A_t les réactions de deux corps électrisés; car c'est réellement à ces réactions, et non pas aux quantités d'électricité des boules que la loi est applicable. Mais comme ces quantités d'électricité sont proportionnelles aux racines carrées des réactions, en les désignant par T_0 et T_t, on aura

$$\frac{T_t^2}{T_0^2} = \frac{A_t}{A_0}\text{; d'où l'on déduira, } \log T_t = T_0 - \frac{at}{2M}.$$

2°. La déperdition croît avec le degré d'humidité de l'air. Dans les jours secs, elle est d'environ 1/60 par minute; dans les temps très-humides, elle s'élève jusqu'à 1/10.

3°. Dans l'air au même degré d'humidité, la déperdition d'électricité est la même, quelles que soient la grosseur, la forme et la nature des corps, pourvu que la tension soit très-petite. Coulomb a vérifié cette loi avec un globe d'un pied de diamètre, avec des cylindres de différentes dimensions, avec des cercles de papier doré, etc.

Il résulte de ces lois que, dans les expériences sur les tensions électriques des corps, il faut d'abord déterminer, par des observations préliminaires, la fraction qui représente la perte de l'électricité pendant une minute, et corriger de cette perte les résultats des expérences.

Il est important de se souvenir qu'à chaque instant les épaisseurs des couches électriques sont proportionnelles aux racines carrées des réactions et des tensions.

900. *Déperdition par les supports.* Nous avons dit précédemment qu'il n'existe aucun corps qui ne conduise plus ou moins l'électricité; on peut facilement constater ce fait en mettant des cylindres de différentes matières non conductrices, en contact avec des corps électrisés : tous, après la séparation auront acquis une certaine tension électrique, de même nature que celle du conducteur, et que l'on pourra facilement reconnaître en les présentant à un électroscope. Il résulte des nombreuses observations de Coulomb, que la faculté conductrice des corps mauvais conducteurs croît rapidement avec la tension électrique et la diminution de leur longueur, de sorte qu'à chaque tension correspond dans chacun de ces corps une certaine longueur pour laquelle l'isolement est complet. Coulomb, après expériences des multipliées, a découvert cette loi remarquable : les longueurs auxquelles un même corps non conducteur de forme cylindrique commence à isoler complétement un corps sont proportionnelles aux carrés des tensions électriques de ce corps.

901. Certains corps non conducteurs, chargés d'électricité qu'on y a développée par le frottement, conservent pendant très-longtemps leurs tensions électriques, malgré le contact de l'air et des corps conducteurs : tels sont principalement les gâteaux de résine, qui, électrisés au moyen d'une peau de chat, sont encore électriques après plusieurs mois. Cet effet doit tenir, du moins en partie,

à la difficulté que l'électricité éprouve à se dégager de ces corps; mais il y a encore une autre cause qui concourt avec celle-là, et dont il sera question à l'article des condensateurs.

902. *Détermination du rapport des tensions dans les différents points de la surface d'un corps conducteur électrisé.* Le procédé employé par Coulomb pour déterminer les tensions des différents points de la surface d'un corps est fondé sur ce principe : si on met en contact avec un point quelconque de la surface d'un corps électrisé un petit disque de papier doré, soutenu par un manche de gomme laque, la tension qu'il acquerra par le contact sera proportionnelle à celle du point du corps qui a été touché. Coulomb vérifia ce principe de plusieurs manières. Il prit d'abord un cylindre conducteur isolé et électrisé, et il le toucha en un point de sa surface avec le disque, qu'il porta dans la balance pour en mesurer la tension; il le toucha de nouveau au même point, à des intervalles de temps égaux et, chaque fois, il mesura la tension acquise par le plan d'épreuve. En comparant les tensions acquises successivement par le disque avec les tensions que le cylindre devait avoir aux mêmes instants par la déperdition due à l'influence de l'air, il trouva l'accord le plus satisfaisant. Il chargea d'électricité un corps conducteur isolé, et le toucha d'abord en un certain point avec le plan d'épreuve, dont la tension fut déterminée à l'aide de la balance de torsion; ensuite il mit le conducteur en contact avec un corps isolé parfaitement égal pour sa nature, sa forme et ses dimensions, et, après la séparation, touchant de nouveau le premier au même point, il reconnut que, dans cette dernière expérience, la tension acquise par le disque était le quart de celle qu'il avait acquise par le premier contact; or, les tensions du cylindre en un même point devaient nécessairement être quatre fois plus grandes dans le premier cas que dans le second [888] : car le corps ayant été mis en contact avec un autre parfaitement égal, l'électricité avait dû se partager également entre eux, et après le contact, il devait avoir seulement la moitié de l'électricité qu'il possédait d'abord. Ainsi les tensions du disque sont proportionnelles à celle du point touché.

Il est même facile de reconnaître qu'un petit plan d'épreuve mis en contact avec une surface électrisée aura, après la séparation, une tension précisément égale au quart de celle que possédait l'élément de la surface qui a été touchée. En effet, quand le plan d'épreuve est tangent à la surface, il se con-

fond avec l'élément qu'il touche, il en prend en quelque sorte la place, et, quand on le retire, on obtient le même effet que si on avait découpé un élément de même épaisseur et de même étendue, et qu'on l'eût enlevé. Mais comme, après la séparation, la couche électrique, qui n'existait que sur une des surfaces, se répand sur toutes les deux, l'épaisseur de la couche se trouve diminuée de moitié.

Ce principe une fois reconnu, la détermination des tensions des divers points d'un corps électrisé ne présente aucune difficulté : car il suffit de le toucher successivement aux différents points dont on veut avoir les tensions, et de mesurer chaque fois, au moyen de la balance de Coulomb, la tension du disque. On doit seulement avoir soin de prendre pour soutenir le disque une gomme-laque bien isolante; il faut pour cela qu'étant mise en contact avec un corps électrisé, après la séparation, elle ne conserve aucune trace d'électricité. De plus on tiendra compte de la déperdition de l'électricité par le contact de l'air; ou, ce qui est beaucoup plus simple, après avoir obtenu la tension de deux points, on prendra de nouveau celle du premier, en laissant entre la seconde et la troisième observation le même temps qu'entre la première et la seconde : la tension du premier point sera la moyenne des deux observations.

903. Par les moyens d'observation que nous venons de décrire, Coulomb a obtenu les résultats suivants. Dans les corps sphériques, la tension est la même pour tous les points, et ce sont les seuls pour lesquels l'uniformité de tension subsiste. Dans les lames prismatiques ou les cylindres très-allongés, la tension est sensiblement la même du milieu jusqu'à 27 millimètres de distance des des extrémités; au delà elle croît avec une grande rapidité. Dans les plaques circulaires, les variations de tension ne se manifestent qu'à $0^m,081$ ou $0^m,108$ du bord, et à partir de cette limite elle croît rapidement à mesure qu'on s'approche du bord, et les points également distants du centre ont la même tension. Dans un ellipsoïde, la tension aux extrémités du grand axe est plus grande que dans tous les autres points, et la différence de tension aux extrémités des axes augmente avec le rapport de leur longueur. Enfin, la tension à l'extrémité des pointes est très-grande et d'autant plus que les pointes sont plus aiguës. D'après Poisson, les tensions électriques aux extrémités des axes d'un ellipsoïde sont proportionnelles aux longueurs des axes qui passent par ces points,

et, par conséquent, si un des axes était infini par rapport aux deux autres, ce qui transformerait les extrémités de l'ellipsoïde en pointes, la tension y serait infinie.

Nous allons maintenant citer quelques cas particuliers pour lesquels Poisson a pu déterminer les tensions, et qui ont été identiques avec celles obtenues par l'expérience.

904. Si deux sphères de diamètres différents sont mises en contact et électrisées dans cet état, l'épaisseur de la couche électrique est nulle au point de contact. A partir de ce point, l'électricité est très-faible sur chacune jusqu'à une assez grande distance; lorsqu'elle commence à devenir sensible, elle est d'abord plus intense sur la plus grande des deux surfaces, mais elle croît ensuite plus rapidement sur la plus petite; et au point diamétralement opposé à celui du contact, l'épaisseur de la couche électrique sur cette dernière sphère est toujours plus grande qu'elle ne l'est au point correspondant sur l'autre. Le rapport des épaisseurs de la couche électrique, dans ces deux points, augmente à mesure que le rayon de la sphère diminue; mais cette accroissement n'est pas indéfini : il tend, au contraire, vers une limite constante que le calcul détermine, et qui est égale à 4, 2.

Lorsqu'on sépare les deux sphères, chacune d'elles emporte la totalité de l'électricité dont elle était recouverte, et après qu'on les a soustraites à leur influence mutuelle, cette électricité se distribue uniformément sur chaque sphère. Le calcul démontre que l'épaisseur de la couche électrique sur la plus petite des deux sphères est plus grande que sur l'autre, et que le rapport de la plus grande épaisseur à la plus petite augmente à mesure que le plus petit rayon décroît. Mais ce rapport n'augmente pas indéfiniment à mesure que le rayon de la petite sphère diminue, il s'approche continuellement d'une valeur égale à 1,65; de sorte que, quand une sphère est mise en contact avec une autre d'un diamètre très-petit par rapport au sien, l'électricité se partage entre elles à peu près dans le rapport de cinq fois la surface de la petite sphère, et trois fois celle la grande.

Quand deux sphères d'inégale dimension ont été électrisées en contact, nous avons déjà dit que la tension au point de contact était nulle; mais si on les écarte, une partie de l'électricité de la petite sphère se décompose, et le point où le contact a eu lieu se charge d'une électricité contraire à celle de la grande sphère. Cet effet diminue à mesure qu'on écarte les sphères et devient nul à une di-

stance qui dépend du rapport de leur rayon; au delà de cette distance, le point où s'est fait le contact se retrouve dans l'état naturel; enfin, à une distance plus grande encore, ce point se charge de la même espèce d'électricité que le reste de la sphère dont il fait partie. Ces phénomènes sont particuliers à la petite sphère; sur la grande l'électricité est toujours et partout de même nature qu'à l'instant du contact.

Nous venons de supposer que les deux sphères avaient été mises d'abord en contact; considérons maintenant deux sphères chargées, dans des proportions quelconques, d'électricité de même nature ou de nature différente, et supposons qu'on les rapproche graduellement. S'il n'existe pas, entre l'espèce et les quantités d'électricité qu'elles possèdent, le rapport particulier qui existerait si elles avaient été mises en contact, les couches électriques dans les points les plus voisins deviennent bientôt de nature différente, si elles ne l'étaient déjà, et leurs épaisseurs croissent indéfiniment à mesure que leur distance diminue; la tension électrique, croissant proportionnellement au carré de cette épaisseur, finit par vaincre la résistance de l'air, et les fluides, s'échappent sous la forme d'étincelle, avant le contact. Les fluides de nature différente, ainsi accumulés avant l'explosion, dans les points les plus voisins, sont à peu près d'égale tension dans les deux sphères. Ainsi, quand les deux sphères ont été d'abord électrisées de manière différente, chacune d'elles conserve, dans le point le plus voisin de l'autre, la même espèce d'électricité qu'elle avait d'abord; mais quand elles ont été chargées d'électricité de même nature, il se fait une décomposition du fluide neutre dans la sphère qui contient moins d'électricité libre qu'elle n'en contiendrait si le contact avait eu lieu, et l'autre reste dans le même état. Toutes ces singulières alternatives ont été vérifiées par l'expérience, et aux distances indiquées par le calcul.

Lorsqu'un cylindre non isolé, terminé par une demi-sphère, est présenté perpendiculairement devant une sphère isolée et électrisée, à une distance assez grande pour qu'il n'y ait pas explosion, l'extrémité du cylindre la plus voisine de la sphère se charge d'une électricité contraire; cette électricité ne se dissipe pas, quoique le cylindre communique avec le sol, parce qu'elle est retenue et en partie dissimulée par l'attraction de l'électricité de la sphère. Coulomb a trouvé, par des observations multipliées, que l'épaisseur de la couche électrique était en raison inverse de la puissance 3/2 de la distance de l'extrémité du cylindre au centre de la sphère, en raison inverse du diamètre du cy-

lindre, et en raison directe de la quantité d'électricité de la sphère : ainsi, en désignant par a la distance de l'extrémité du cylindre à la surface de la sphère, par R le rayon de la sphère, par e l'épaisseur uniforme de la couche électrique qui la recouvre, par E l'épaisseur de la couche électrique à l'extrémité du cylindre, on a

$$E = -\frac{mR^2e}{r(R+a)^{\frac{1}{2}}};$$

m est un coefficient constant qui doit être déterminé par l'expérience. Cette même formule serait encore applicable à un cylindre isolé très-long, attendu que l'on pourrait négliger l'action de l'électricité contraire, qui s'accumulerait à l'extrémité opposée.

905. *Observations sur les hypothèses admises pour expliquer les phénomènes électriques.* L'explication que nous avons donnée des phénomènes électriques, repose sur l'hypothèse de l'existence de deux fluides dont les molécules similaires se repoussent, et celles de natures différentes s'attirent. Tous les phénomènes s'expliquent dans cette hypothèse avec une extrême précision; mais la réalité de l'hypothèse ne s'ensuit pas nécessairement : car pour qu'il en fût ainsi, il faudrait démontrer qu'aucune autre hypothèse ne peut également satisfaire aux faits observés, ce qui est impossible. Nous verrons d'ailleurs des phénomènes dont on rend difficilement compte dans l'hypothèse des deux fluides. Franklin a le premier imaginé d'expliquer les phénomènes électriques en n'admettant qu'un seul fluide : les corps à l'état naturel en renfermeraient de certaines quantités qui ne manifesteraient point leur présence; mais, si ces quantités étaient augmentées ou diminuées, les corps agiraient comme s'ils étaient électrisés positivement ou négativement. Cette hypothèse n'a point été admise, parce qu'elle est insuffisante pour expliquer les attractions et les répulsions dans les différents cas où elles se manifestent. Mais si on ajoute à la supposition de Franklin, que l'espace soit rempli du fluide électrique, tous les phénomènes s'expliquent facilement, comme Bigeon l'a fait voir le premier. (*A. C. et P.*, t. XXXVIII.) En effet, considérons deux corps sphériques A et B en présence, désignons leurs volumes par v et v', leurs tensions électriques par e et e', et par E celle du milieu environnant. Traçons sur la ligne des centres une sphère A' égale a A, et symétriquement placée par rapport à B, et une sphère B' égale à B symétriquement placée par rapport à A. L'action de A sur B résultera de la différence des actions des sphères A et A', et sera

proportionnelle à v $(e-E)$. L'action de B sur A sera de même proportionnelle à v' $(e'-E)$, et, par conséquent, l'action réciproque sera kvv' $(e-E)(e'-E)$, k étant un coefficient dépendant de la nature de l'action électrique, et devra être divisé par d^2, d étant la distance des deux corps. Or cette expression indique des répulsions quand e et e' sont tous deux plus grands ou plus petits que E; et des attractions, quand l'un est plus grand et l'autre plus petit que E. D'après le même physicien, les calculs de Poisson sur la distribution de l'électricité dans les corps conducteurs s'appliqueraient à la nouvelle hypothèse; seulement, il faudrait admettre que le fluide électrique est incompressible, et que la quantité d'électricité qu'on peut ajouter ou enlever est infiniment petite relativement à celle que contiennent les corps. L'électricité du milieu ambiant serait adhérente aux molécules d'air, mais le vide pourrait en contenir.

Bigeon a appuyé son explication par un fait qui paraît en opposition avec l'hypothèse des deux fluides, et qui est une conséquence nécessaire de celle qu'il avait adoptée. En suspendant, sous une cloche, près d'une boule de moelle de sureau fixe et isolée, une autre boule placée à l'extrémité d'un fil de gomme laqu horizontal, soutenu par un fil de cocon, une très-faible diminution dans la densité de l'air a toujours produit une répulsion qui disparaissait en rendant l'air : l'électricité développée était positive. Il est évident que, dans l'hypothèse d'un seul fluide, diminuer la densité de l'air, c'est diminuer la tension électrique du milieu environnant. Au premier abord, l'effet du tourniquet électrique dans le cas d'une tension négative paraît en opposition avec l'hypothèse d'un seul fluide; mais cet effet, d'après Bigeon, résulte de ce que la pointe et le milieu environnant se trouvent à chaque instant au même état électrique, et qu'il doit en résulter une répulsion.

Il est bien fâcheux qu'une mort prématurée ait empêché Bigeon de suivre ces recherches; car je regarde l'hypothèse qu'il avait adoptée comme bien plus probable que celle qui est généralement admise.

§ 2. *Appareils électriques.*

906. *Machines électriques.* La plupart des phénomènes que nous avons décrits n'exigeant que de faibles tensions électriques, le frottement d'un cylindre de verre ou de cire d'Espagne par un morceau de drap tenu à la main était suffisant pour développer les petites quantités d'électricité nécessaires à leur manifestation; mais,

pour un grand nombre d'expériences qui nous restent à décrire, de plus puissants appareils sont nécessaires.

907. La machine électrique la plus ordinaire est composée (fig. 522, 522 A, 522 B) d'un plateau de verre circulaire, vertical, mobile sur son axe, et qui, dans sa rotation, frotte contre quatre coussins *m, n, p, q,* en crin, recouverts de peau, et fixés aux montants qui supportent l'axe du plateau. Deux cylindres creux en cuivre, MN et M'N', montés sur des supports isolants, se terminent par des branches garnies de pointes, et qui embrassent le plateau sans le toucher. Lorsqu'on fait tourner le plateau au moyen de la manivelle ABC, le frottement du verre contre les coussins développe deux espèces d'électricité : l'électricité positive se répand sur la surface du plateau, et l'électricité négative passe dans les coussins, d'où se dissipe dans le sol avec lequel ils communiquent. L'électricité positive du plateau décompose à distance l'électricité naturelle des conducteurs MN et M N'; l'électricité négative, qui est attirée dans la partie du conducteur la plus voisine du plateau, s'écoule sur le verre, où elle forme du fluide naturel; cet écoulement a lieu d'une manière continue ou par intermittences, suivant que les extrémités des conducteurs sont garnies de pointes ou de boules. Alors la partie opposée du conducteur se charge d'une quantité correspondante de fluide positif, dont la tension va continuellement en augmentant, jusqu'à ce que l'accroissement de tension soit égal à l'accroissement de perte par le contact de l'air, ou, si le développement est très-rapide, jusqu'à ce que la tension puisse vaincre la résistance de l'air.

908. Pour qu'une semblable machine fournisse le plus d'électricité possible dans les mêmes circonstances, il y a plusieurs conditions essentielles à remplir : 1° Les coussins doivent être enduits *d'or mussif* bien lavé, ou d'un alliage formé avec deux parties d'étain, quatre de zinc et sept de mercure : car l'expérience a fait reconnaître que le frottement du cuir nu sur le verre développait beaucoup moins d'électricité que quand il avait été recouvert des substances dont nous venons de parler. 2° Les coussins doivent communiquer avec le sol : car c'est encore un fait d'expérience, que deux corps isolés donnent beaucoup moins d'électricité par leur frottement que quand l'un deux communique avec le sol. La raison en est d'ailleurs facile à saisir. En effet, soient A et B deux corps isolés qui, par leur frottement, mettent en liberté des quantités de fluides positif et négatif, que je représenterai par $+a$

et $-a$ (j'emploie la même lettre avec des signes différents pour indiquer que ces quantités peuvent se neutraliser mutuellement), ces électricités tendent à se combiner, et cette tendance augmentant à mesure que le frottement en développe une plus grande quantité, l'influence du frottement, pour décomposer une nouvelle quantité de fluide naturel, ira en décroissant, et deviendra nulle lorsque l'attraction des fluides libres $+a$ et $-a$ sera égale à la force que produit le frottement pour décomposer du fluide naturel; mais si l'une des deux électricités peut se dégager, l'autre, en agissant par influence, concourra avec le frottement pour opérer de nouvelles décompositions du fluide naturel. 3° Il doit y avoir autant de branches garnies de pointes, qu'il y a de paires de coussins, afin que la partie du plateau qui se présente au frottoir soit toujours à l'état naturel. 4° Le conducteur, excepté l'extrémité des branches qui enveloppent le plateau, ne doit renfermer aucune pointe, ni aucun corps aigu : car la tension y deviendrait beaucoup plus grande que dans le reste du conducteur, et le fluide s'écoulerait continuellement dans l'air par leurs extrémités. 5° Le conducteur doit être supporté par des corps très-isolants, tels que des cylindres de verre enduits de gomme laque. 6° Pour éviter la déperdition de l'électricité du plateau par l'air, dans le trajet des frottoirs aux pointes du conducteur, on fixe contre les montants qui en supportent l'axe, des quarts de cercle en taffetas gommé; ou bien, on incline les tiges du conducteur, de manière que les pointes soient voisines des frottoirs. Lorsque les conducteurs sont garnis de pointes, ils peuvent se charger sous une très-faible tension; mais ils ne restent chargés qu'autant que la machine est en mouvement. Dans les premières machines électriques, on employait des globes ou des cylindres de verre, que l'on faisait tourner sur leur axe. C'est Ramsden qui, le premier, leur a substitué des plateaux de glace.

909. Pour obtenir de fortes étincelles, qui s'élancent à de grandes distances sur les corps environnants, on emploie souvent des conducteurs isolés que l'on met en communication avec ceux de la machine, et qu'on désigne sous le nom de *conducteurs secondaires*. Il faut évidemment donner à ces conducteurs des formes telles qu'ils se recouvrent d'une couche électrique la plus épaisse possible, comparativement à celle du conducteur de la machine. Les cylindres d'une grande longueur et d'un petit diamètre sont éminemment propres à remplir cette condition. Volta employait un sys-

tème de 12 cylindres de 6 lignes de diamètre et de 8 pieds de longueur, communiquant ensemble, mais assez éloignés pour qu'ils ne se nuisent point par leur influence mutuelle. Ce système, qui renferme 12 pieds carrés de surface, lance de très-grandes étincelles, et produit sur les organes des effets très-énergiques.

Coulomb a trouvé qu'en mettant en communication des cylindres très-longs, dont les diamètres étaient représentés par r et r', les épaisseurs e et e' des couches électriques dont ils se chargeaient étaient représentés par

$$\frac{e'}{e} = 0,18784 . \frac{r}{r'^{\frac{7}{10}}},$$

la ligne étant prise pour unité de longueur.

910. La machine que nous venons de décrire ne donne que de l'électricité positive; si on voulait avoir de l'électricité négative, il faudrait former les montants *mp* et *nq* avec des glaces, et faire communiquer les frottoirs avec un autre conducteur isolé. On obtiendrait à la fois les deux électricités sur les deux conducteurs; mais la tension serait beaucoup plus grande en faisant communiquer un des conducteurs avec le sol.

911. Van-Marum, de Harlem, a imaginé une construction de machine qui donne à volonté de l'électricité positive ou de l'électricité négative. Cette machine est représentée fig. 523 et 523 A. Pour obtenir de l'électricité positive sur le conducteur M (fig. 523 A), les deux branches A et B sont disposées verticalement, et les branches C et D touchent les frottoirs pour établir leur communication avec le sol. Lorsqu'on veut avoir de l'électricité négative (fig. 523) on place horizontalement les branches A et B, de manière qu'elles communiquent avec les frottoirs, et les branches CD verticalement, pour qu'elles déchargent le plateau.

912. On pourrait facilement faire des machines à électricité négative, en faisant frotter du taffetas ciré sur de la peau de chat. La figure 524 représente la disposition la plus simple de cet appareil.

913. Mais, de toutes les machines électriques, la plus simple et la plus commode pour obtenir à volonté l'une ou l'autre espèce d'électricité, ou toutes deux à la fois, est celle qui est due à Nairne. Elle est représentée fig. 525, 525 A. Cette machine se compose d'un grand cylindre de verre rétréci à ses deux extrémités, et garni de deux prolongements métalliques placés dans l'axe du

cylindre, et qui tournent dans deux coussinets isolés; un d'eux est garni d'une manivelle; de chaque côté du cylindre de verre sont placés deux cylindres de cuivre isolés, dont l'un est armé de pointes, l'autre d'un frottoir. On conçoit facilement que, le premier conducteur étant mis en contact avec le sol, l'autre se chargera d'électricité négative; que quand le second sera lui-même en communication avec le sol, le premier prendra l'électricité positive, et enfin que si tous les deux restaient isolés, chacun se chargerait d'une des espèces d'électricité. Quel que soit d'ailleurs le système de machine qu'on emploie, la quantité d'électricité est proportionnelle à la vitesse de rotation, et indépendante de la pression des frottoirs.

914. M. Armstrong a construit une nouvelle machine électrique, dans laquelle le dégagement de l'électricité résulte du frottement de la vapeur. Cette machine produit des effets si supérieurs à ceux qu'on obtient des plus grandes machines à plateaux de verre que nous croyons devoir la décrire.

La machine de M. Armstrong se compose d'une chaudière à vapeur en tôle, cylindrique, à foyer inférieur; l'air chaud, en sortant du foyer, s'échappe par un grand nombre de tubes qui traversent l'eau: c'est une disposition semblable à celle des locomotives. La chaudière, y compris la boîte à fumée, a $2^m,45$ de longueur et environ 1 mètre de diamètre. Elle est supportée par 6 pieds de verre de 1 mètre de hauteur. La vapeur, en sortant de la chaudière, se rend, par trois courtes tubulures, dans un long cylindre horizontal, où le refroidissement dû au contact de l'air en condense une partie. Le mélange de vapeur et d'eau se dégage par 46 tubes recourbés, qui se terminent chacun par un petit tuyau de bois, environné d'un tube de laiton; la vapeur pénètre dans les tuyaux de bois par un orifice latéral de 4 millimètres de diamètre, et rencontre, à quelques millimètres, un petit plan qui lui fait obstacle, l'oblige à tourner autour et à se répandre dans le tube en s'épanouissant. La vapeur, après sa sortie, rencontre des peignes métalliques qui communiquent avec le sol; ils ont pour objet d'enlever l'électricité à la vapeur et de l'empêcher de retourner à la chaudière; ils sont placés très-près des orifices des jets dans les expériences qui demandent de grandes quantités d'électricité et non de longues étincelles; mais, quand on veut obtenir de grandes tensions, ils sont éloignés à une distance de 9 à 12 centimètres des orifices d'écoulement. Cette machine produit près de cinquante fois

plus d'effet que la grande machine à plateau de verre de l'Institution polytechnique, qui a $2^m,27$ de diamètre, et donne des étincelles de 60 centimètres de longueur. Mais la puissance de cette machine est surtout remarquable, quand on lui fait produire des courants. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet (*A. C. et P.*, t. x).

On fait ordinairement avec les machines électriques quelques expériences, dont les effets s'expliquent facilement au moyen de la théorie que nous avons exposée.

915. On place à l'extrémité du conducteur un plateau métallique AB (fig. 526), communiquant avec lui, et au-dessous un autre plateau CD, en communication avec le sol; si l'on met entre eux un corps léger *mn* lesté en *n*, la machine étant en mouvement; le corps *mn* sera attiré vers AB, et, aussitôt qu'il l'aura touché, il en sera repoussé comme possédant la même espèce d'électricité; en retombant sur le plateau CD, il reviendra à l'état naturel, et sera de nouveau attiré et repoussé, tant que la machine sera en mouvement.

On fait aussi cette expérience d'une autre manière. ACBD (fig. 527) est un cylindre de verre, fermé inférieurement par un plateau métallique qui communique avec le sol, et supérieurement par un autre disque métallique, en contact avec le conducteur d'une machine électrique. On met dans le cylindre des boules de sureau; elles s'élèvent et retombent successivement.

AB (fig. 528) est une tige métallique, communiquant avec le conducteur, et supportant trois timbres C, D, E, le premier et le troisième par des chaînes métalliques, et celui du milieu par un cordon de soie; ce dernier communique avec le sol par la chaîne *g*; entre les timbres extrêmes et celui du milieu sont suspendues, par des cordons de soie, deux petites boules de cuivre *a* et *b*. Lorsqu'on fait tourner la machine, la boule *a* se meut entre les timbres C et D, et la boule *b* entre les timbres D et E, comme le corps *mn* de l'expérience précédente entre les plateaux AB et CD. Cet appareil porte le nom de *carillon électrique*.

916. Lorsqu'on place un corps conducteur, terminé par une pointe aiguë, sur le conducteur d'une machine électrique, il se charge très-peu; le même effet se manifeste quand on place dans le voisinage du conducteur un corps conducteur communiquant avec le sol, et terminé par une pointe aiguë. L'explication de ces effets se déduit facilement de ce que nous avons dit précédemment. On peut rendre manifeste l'écoulement de l'électricité, dans le dernier

cas, au moyen de l'appareil à timbre fig. 529. Les tiges ombrées sont conductrices.

917. Si on dispose sur le conducteur d'une machine électrique une tige *ab* (fig. 530), sur laquelle repose une aiguille métallique terminée par deux pointes inclinées en sens contraire sur sa direction, pendant le mouvement du plateau l'aiguille tourne en sens contraire de la direction des pointes. Ce phénomène avait été assimilé, comme nous l'avons déjà dit, aux effets de réaction produits par l'écoulement des liquides et des gaz, en considérant la couche d'air qui environne un corps électrisé comme un vase qui retenait le fluide, mais dont les parois n'étaient susceptibles que d'une résistance limitée : alors, si, en un point quelconque de la surface, la tension électrique l'emportait sur cette résistance, le vase était percé, le fluide s'écoulait et la pression sur le point opposé du vase lui donnait un mouvement en sens contraire de l'écoulement. Cette explication était cependant difficile à admettre, car, l'action étant égale à la réaction, il fallait supposer à l'électricité une masse finie ou une vitesse infiniment grande. Mais Aimé a fait voir que cette explication était inexacte : une aiguille contournée en S, enduite de vernis dans toute son étendue, excepté à l'extrémité des pointes, et soutenue horizontalement dans une cloche par un fil métallique extrêmement fin et recouvert de vernis, ne tourne pas lorsqu'on a fait le vide dans la cloche, et que le fil de suspension communique avec une machine électrique en activité, quoique alors l'électricité s'écoule rapidement par les pointes : ce dont il est facile de s'assurer en faisant l'expérience dans l'obscurité. Il est très-probable, d'après cela, que le mouvement dont il s'agit provient de la force répulsive exercée sur l'aiguille par l'air que le courant électrise. Cette explication est encore appuyée par un autre fait, également observé par Aimé : le tourniquet électrique fonctionne lorsqu'il est plongé dans un liquide mauvais conducteur, tel que l'huile, et reste immobile quand il est plongé dans l'eau.

918. Quand liquide s'échappe d'un vase par des orifices assez capillaires pour que l'écoulement ait lieu par intermittences et goutte à goutte, en électrisant le vase, l'écoulement devient continu ; mais, d'après Carmoy, la dépense n'est pas augmentée. Ce dernier résultat paraît assez singulier, attendu que le premier s'explique naturellement par une diminution de pression de l'air à l'extrémité des tubes d'écoulement ; peut-être la différence de dépense était trop

petite pour être appréciable par les moyens qui ont été employés pour la mesurer. Il paraît aussi qu'un liquide électrisé s'évapore plus rapidement qu'un liquide qui ne l'est pas.

919. *Électrophore.* Cet appareil, imaginé par Wilk, est composé (fig. 531) d'un gâteau de résine à surface bien plane, renfermé dans une enveloppe métallique AB, et d'un disque métallique CD d'un diamètre un peu plus petit, armé d'un manche isolant EF. Pour se servir de cet appareil, on bat le gâteau de résine avec une peau de chat, et l'on place dessus le disque CD. L'électricité négative, dont la résine a été chargée par le frottement, décompose le fluide naturel du plateau métallique; l'électricité positive se répand sur la face inférieure et l'électricité négative sur la face supérieure; le fluide positif du plateau ne se combine pas avec le fluide négatif du gâteau, à cause de la difficulté que l'électricité éprouve à se mouvoir dans la résine. Si alors on soulève le plateau, ses deux électricités, qui ont été séparées par l'influence de celle dont la résine est chargée, se combineront et tout rentrera dans l'état initial; mais si, avant de soulever le plateau, on touche sa surface supérieure avec le doigt, on augmentera la quantité d'électricité décomposée, en permettant à l'électricité négative de s'échapper, et, après sa séparation du gâteau, le disque possédera toute l'électricité positive libre qui était répandue sur la surface inférieure. Comme le gâteau ne perd que très-lentement son électricité, l'expérience pourra être répétée un grand nombre de fois; à la fin cependant l'électricité du gâteau finira par disparaître.

920. L'électricité de la résine agit sur son enveloppe métallique de la même manière que sur le plateau métallique; mais, comme cette enveloppe communique avec le sol, elle se charge seulement d'électricité positive; c'est ce que l'on peut mettre en évidence de la manière suivante : si l'on fait communiquer le plateau avec la petite boule *a* (fig. 532), et l'enveloppe du gâteau de résine avec la boule *b*, un pendule isolé *c* oscillera continuellement entre les deux boules. La raison en est évidente : la boule *a*, étant en communication avec la partie supérieure du plateau, partagera son électricité négative, et la boule *b*, étant en communication avec l'enveloppe du gâteau, partagera son électricité positive. Alors la boule du pendule, se trouvant à l'état naturel, se rapprochera de la boule qui aura la plus grande tension; en la touchant elle partagera son électricité, elle sera alors repoussée; les mêmes phéno-

mènes se reproduiront sur l'autre boule, et ces alternatives dureront tant que le gâteau conservera de l'électricité.

On pourrait aussi charger la résine d'électricité positive, en mettant le gâteau en contact avec le conducteur d'une machine électrique : les mêmes phénomènes auraient lieu.

Des plateaux de 10 à 15 centimètres de diamètre donnent, à l'approche du doigt ou d'un corps conducteur, des étincelles très-visibles en plein jour. Ces appareils conservent souvent l'électricité pendant plusieurs mois, tant la résine laisse difficilement dégager l'électricité dont elle est chargée. Ils sont souvent employés dans les laboratoires de chimie pour les expériences eudiométriques.

921. Pour mettre en évidence l'espèce d'adhérence qui existe entre la résine et les deux fluides électriques, on fait une expérience curieuse, que nous allons rapporter. Sur la surface d'un plateau de résine on trace, avec un corps conducteur chargé d'électricité, des caractères quelconques; l'électricité reste sur ces lignes : car, si l'on jette sur le plateau une poudre d'un corps non conducteur, et qu'on l'incline, la poudre reste fixée au plateau sur les lignes parcourues par le corps électrisé. On rend cette expérience plus piquante en traçant des caractères avec les deux espèces d'électricité, et injectant sur la surface, au moyen d'un petit soufflet, un mélange de soufre et de minium; le soufre se fixe sur les traits chargés d'électricité positive, et le minium sur les traits chargés d'électricité négative : par conséquent, les premiers caractères sont jaunes et les derniers sont rouges. Cette séparation provient de ce que, dans le frottement du soufre et du minium, le premier prend l'électricité négative, et le second l'électricité positive.

922. On doit à M. Masson l'observation de plusieurs phénomènes très-curieux, qui proviennent des mêmes causes que ceux dont nous venons de parler. Si on place une médaille sur un gâteau de résine et si on la fait traverser par une étincelle électrique, le fluide laisse sur la résine une empreinte fidèle de la face de la médaille qui était en contact avec lui, et que l'on rend visible par du minium projeté à l'aide d'un soufflet. L'expérience ne réussit bien qu'autant que la couche de résine est d'une faible épaisseur et qu'elle repose sur une plaque métallique en communication avec le sol. En opérant avec de l'électricité positive, les parties saillantes de la médaille sont représentées par des lignes recouvertes de minium, et l'empreinte est entourée d'une auréole dont les rayons semblent partir du centre. On obtient une empreinte plus nette, en plaçant

sur la médaille en communication avec le sol une plaque mince de résine et au-dessus une plaque métallique qui reçoit les étincelles. Dans ce cas il n'y a pas d'auréole.

On parvient aussi à former des empreintes très-nettes, en frottant une médaille avec de la plombagine de manière qu'il n'en reste que dans les creux, la plaçant sur une feuille de papier, et la faisant traverser par une étincelle : la plombagine se détache de la médaille et s'applique sur le papier en conservant la même configuration.

923. On peut disposer l'électrophore de manière à obtenir des étincelles sans être obligé de toucher le plateau ; il suffit pour cela de coller contre le gâteau (fig. 533) une petite bande d'étain laminé qui communique avec le sol, ou seulement avec l'enveloppe du gâteau ; il est évident que, par cette disposition, on obtiendra le même effet que si on touchait la face inférieure du plateau : l'électricité qu'on obtient alors, après avoir soulevé le plateau, est encore positive.

924. On a employé des électrophores dans les briquets à gaz hydrogène, pour enflammer le gaz. La fig. 534 en représente la disposition la plus simple : le gaz hydrogène est fourni par un appareil semblable à celui de M. Gay-Lussac [367] ; mais, en même temps qu'en tournant le robinet on produit un écoulement de gaz hydrogène, le même mouvement fait naître, entre deux pointes placées de chaque côté de l'orifice, une étincelle provenant d'un électrophore renfermé dans la boîte MN, étincelle qui enflamme le gaz en le traversant.

925. *Condensateurs.* Soient A et B (fig. 535) deux plateaux métalliques communiquant, le premier avec le conducteur d'une machine électrique, le second avec le sol, et séparés l'un de l'autre par un disque de verre d'un plus grand diamètre ; supposons que la machine produise de l'électricité positive : le plateau A prendra d'abord une certaine quantité d'électricité positive qui agira à distance à travers le disque de verre, sur le plateau B, décomposera son électricité naturelle, attirera contre le disque le fluide négatif, et refoulera dans le sol le fluide positif. Représentons par V la quantité d'électricité du premier plateau, et par R celle du second : V sera nécessairement plus grand que R, car cette dernière, étant neutralisée par la première à la distance de l'épaisseur du verre, sera plus petite que celle qui le serait au contact. Réciproquement, R, en agissant sur V, en neutralise une partie, mais qui sera plus

petite que celle qu'il neutraliserait au contact, et, par conséquent, plus petite que R. Ainsi, la quantité totale d'électricité renfermée dans le plateau inférieur sera dissimulée, et une partie de celle du premier plateau le sera par l'électricité du plateau inférieur. Par conséquent, le premier plateau pourra prendre une nouvelle charge d'électricité, dont une partie sera neutralisée par la réaction de celle qu'elle développera dans B. Alors, en supposant que la machine fournisse toujours de l'électricité, la charge du plateau A deviendra stationnaire, lorsque la partie d'électricité libre deviendra égale à celle qu'il acquerrait s'il communiquait avec le conducteur, sans faire partie de l'appareil. Si le plateau inférieur ne communiquait pas avec le sol, l'appareil se chargerait peu, parce que le fluide positif du plateau inférieur ne pourrait pas se dégager et exercerait une action répulsive sur la charge du plateau supérieur.

Toutes ces conséquences théoriques sont parfaitement confirmées par l'expérience. En effet, si, après avoir chargé un condensateur au moyen d'une machine, on isole les deux plateaux en enlevant le conducteur *ab* et la chaîne *cd*, et qu'on les sépare, on les trouvera chargés d'électricités différentes; et si on met en communication les deux plateaux au moyen de l'appareil fig. 536, que l'on nomme *excitateur* (c'est un conducteur dont les extrémités peuvent être rapprochées au moyen d'une charnière, et que l'on tient par des manches isolants), en appliquant un des boutons contre un des plateaux, et approchant l'autre bouton de l'autre plateau, il se fait à une petite distance une violente explosion. Si on met les plateaux en contact par les mains ou toute autre partie du corps, on éprouve une vive commotion qui affecte principalement les articulations. Cette commotion se fait même sentir à travers une chaîne composée d'un grand nombre de personnes, pourvu que ses extrémités soient en contact avec les deux plateaux.

926. Lorsqu'un condensateur a été ainsi déchargé, par de nouveaux contacts, au moyen de l'excitateur, on obtient encore des étincelles, parce qu'une partie des électricités accumulées contre les faces opposées de la lame de verre pénètre dans cette lame, et ne s'en dégage que difficilement; c'est ce que l'on peut constater par l'expérience suivante. Après avoir chargé un condensateur à lame de verre, on le place sur un isoloir; on enlève le plateau supérieur, il donne une étincelle, mais très-petite; ensuite on enlève la lame de verre et on touche le plateau inférieur,

il ne donne également qu'une faible étincelle ; on replace alors la lame de verre ainsi que le plateau supérieur, et le condensateur se trouve chargé presque aussi fortement qu'il l'était d'abord. Ainsi les charges des deux plateaux étaient restées presque en totalité sur les faces opposées de la lame de verre.

927. Un condensateur isolé peut être déchargé en touchant alternativement les deux plateaux. En effet, le plateau A, renfermant de l'électricité libre, la cédera entièrement si on le touche avec un corps communiquant avec le réservoir commun ; mais alors toute l'électricité de B ne sera plus dissimulée : par conséquent, B donnera aussi à son tour une certaine quantité d'électricité par le contact ; par la même raison, A, par la diminution d'électricité de B, acquerra une nouvelle quantité d'électricité libre, et ainsi de suite. Ainsi, par des contacts alternatifs de chaque plateau, on développe de l'électricité libre dans l'autre, et on parvient à décharger complétement l'appareil.

Représentons par V_1, V_2, V_3, etc., V_n, les quantités d'électricité qui se trouvent successivement sur le plateau supérieur ; par R_1, R_2..., R_n, les quantités d'électricité qui se trouvent sur le plateau inférieur, et par μ la fraction qui représente la partie d'électricité neutralisée dans un plateau par celle qui se trouve dans l'autre : nous aurons la suite d'équations

$$\left.\begin{array}{l} R_1 = \mu V_1 \\ V_2 = \mu R_1 \\ R_1 = \mu V_2 \\ V_3 = \mu R_2 \\ \dots\dots\dots \\ V_n = \mu R_{n-1} \end{array}\right\} \text{On déduit de ces équations} \left\{\begin{array}{ll} V_2 = \mu^2 V_1 & R_2 = \mu^2 R_1 \\ V_3 = \mu^4 V_1 & R_3 = \mu^4 R_1 \\ V_4 = \mu^6 V_1 & R_4 = \mu^6 R_1 \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ V_n = \mu^{2(n-1)} V_1 & R_n = \mu^{2(n-1)} R_1 \end{array}\right.$$

Si dans la valeur de R_n on remplace R_1 par sa valeur μV_1, il vient $R_n = \mu^{2n-1} V_1$: ainsi les quantités d'électricité qui restent dans les plateaux supérieur et inférieur forment les progressions décroissantes

$$V_1,\ \mu^2 V_1,\ \mu^4 V_1,\ \mu^6 V_1,\ \mu^8 V_1,\ \text{etc.}$$
$$\mu V_1,\ \mu^3 V_1,\ \mu^5 V_1,\ \mu^7 V_1,\ \mu^9 V_1,\ \text{etc.}$$

Les pertes que les plateaux éprouvent successivement forment également des progressions géométriques : en effet les pertes du plateau supérieur sont

$$V_1 - V_2 = V_1(1-\mu^2),\quad V_2 - V_3 = V_1(1-\mu^2)\mu^2,$$
$$V_3 - V_4 = V_1(1-\mu^2)\mu^4,\ \text{etc.}$$

Celles du plateau inférieur sont

$$R_1 - R_2 = V_1(1-\mu^2)\mu,\quad R_2 - R_3 = V_1(1-\mu^2)\mu^3,$$
$$R_3 - R_4 = V_1(1-\mu^2)\mu^5,\ \text{etc.}$$

On peut facilement vérifier l'exactitude de ces formules : car la somme totale des pertes du premier plateau, en supposant le nombre des contacts infini, doit être égale à V_1, et celle des pertes du plateau inférieur doit être égale à R_1 :

La première somme est

$$V_1(1-\mu^2)(1+\mu^2+\mu^4+\mu^6+, \text{etc.}),$$

la seconde est $$V_1(1-\mu^2)(\mu+\mu^3+\mu^5+\mu^7+, \text{etc.});$$

mais $$1+\mu^2+\mu^4+, \text{etc.} = \frac{1}{1-\mu^2}.$$

Ainsi la somme des pertes du premier plateau est

$$\frac{V_1(1-\mu^2)}{1-\mu^2} = V_1,$$

et celle du second est

$$V_1(1-\mu^2)\frac{\mu}{1-\mu^2} = V_1\mu = R_1.$$

928. On peut rendre évidente la présence de l'électricité mise successivement en liberté sur les deux plateaux, au moyen de l'appareil fig. 537; chaque plateau est garni d'une tige métallique, armée d'un petit pendule, dont le mouvement décèle la présence de l'électricité libre dans le plateau avec lequel il communique.

929. La quantité d'électricité qui peut s'accumuler dans un condensateur est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la surface des plateaux, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante. Il semblerait, d'après cela, qu'on pourrait augmenter indéfiniment la faculté condensante d'un appareil, en diminuant convenablement l'épaisseur de la plaque isolante; mais il n'en est pas ainsi : car, si son épaisseur est très-petite relativement à la tension des électricités qui la pressent, les actions électriques la brisent.

930. On peut se servir, pour corps isolant, de verre, de résine, de taffetas gommé, et même d'une couche de vernis, dont on enduit les faces de contact des deux plateaux. Les condensateurs de taffetas gommé ont le grand inconvénient de n'être pas comparables, parce que, par la pression, le taffetas gommé développe de l'électricité. Les condensateurs à vernis ne peuvent être employés que pour accumuler de petites doses d'électricité, qui, par leur réunion, ne produisent que de faibles tensions. On pourrait aussi employer une couche d'air, en séparant les deux plateaux par un petit intervalle : la limite de la saturation aurait évidemment lieu lorsque l'attraction des deux électricités pourrait vaincre la résistance de l'air; la charge de l'appareil serait beaucoup plus petite que dans

les autres cas. Quelle que soit d'ailleurs la nature du corps isolant employé, il faut, pour éviter la décharge latérale, que le disque isolant ait un plus grand diamètre que les plateaux.

931. La force condensante d'un condensateur est représentée par le rapport entre la quantité totale d'électricité que possède le plateau supérieur et celle qui s'y trouve libre, et on peut facilement trouver ce rapport par l'expérience.

En désignant par A la quantité d'électricité introduite dans le plateau supérieur, elle neutralisera à distance, dans le plateau inférieur, une quantité — B d'électricité contraire; et cette dernière, réagissant sur la charge du plateau supérieur, dissimulera dans ce dernier une quantité A′ d'électricité : ainsi, en désignant par E la quantité d'électricité libre du plateau supérieur, on aura

$$E = A - A';$$

mais remarquons que le rapport de A à B doit être le même que celui de B à A′ : par conséquent, en le désignant par m, nous aurons

$$B = -mA, \text{ et } A' = -mB; \text{ d'où } A' = m^2A, \text{ et } E = (1-m^2)A;$$

ainsi

$$\frac{A}{E} = \frac{1}{1-m^2}.$$

Ce dernier rapport est la mesure de la force condensante de l'appareil.

On pourrait déterminer la valeur de m en chargeant le condensateur d'une quantité quelconque d'électricité, l'isolant, séparant les plateaux et les touchant successivement par un même plan d'épreuve, que l'on appliquerait sur des points semblablement situés sur chacun d'eux : les racines carrées des réactions du plan d'épreuve, que l'on déterminerait au moyen de la balance de Coulomb, seraient proportionnelles aux quantités totales d'électricité qui se trouvaient dans chacun des plateaux lorsqu'ils étaient appliqués sur la lame isolante; car, quand on les sépare, la majeure partie de l'électricité reste adhérente au verre, mais celle qui se trouve sur chacun d'eux doit être proportionnelle à la quantité totale.

Mais on peut déterminer la quantité m sans démonter le condensateur; pour cela il faut l'isoler, mettre le disque inférieur en contact avec le sol, toucher le disque supérieur avec le plan d'épreuve, mettre le disque supérieur en contact avec le sol, et déterminer la tension du disque inférieur en le touchant avec le même plan d'épreuve : le rapport des racines carrées des deux tensions est égal à la quantité m. En effet, nous avons trouvé

$$\frac{A}{E} = \frac{1}{1-m^2},$$

quand la tension existe sur le plateau supérieur; on trouverait de même

$$\frac{B}{E'} = \frac{1}{1-m^2},$$

quand on a mis le plateau supérieur en contact avec le sol.

Ainsi $\frac{E'}{E} = \frac{B}{A}$; mais $B = -mA$: donc $\frac{E'}{E} = m$.

932. Il est infiniment probable que l'électricité qui est retenue si fortement dans les corps non conducteurs, l'est, en partie du moins, par une action analogue à celle qui a lieu dans les condensateurs : l'électricité libre doit décomposer le fluide naturel intérieur, et la difficulté que le fluide éprouve à se mouvoir doit les maintenir comme dans un condensateur.

933. L'appareil que l'on désigne sous le nom de *bouteille de Leyde* (fig. 538) est composé d'un flacon rempli d'or en feuilles, d'étain laminé, ou de toute autre matière conductrice, fermé par un bouchon recouvert de vernis à la gomme laque ou de cire d'Espagne, à travers lequel passe une tige terminée inférieurement par une pointe, et supérieurement par un bouton; la surface extérieure jusqu'à la hauteur *mn* est recouverte d'une feuille d'étain. Le métal enveloppant porte le nom d'*armature extérieure*, et celui qui est dans le flacon ainsi que la tige *mn* sont désignés sous le nom d'*armature intérieure*. Il est évident que cet appareil est de même nature que les condensateurs, car il est formé de deux corps conducteurs séparés par une lame isolante. Par conséquent, tout ce que nous avons dit des condensateurs est applicable aux bouteilles de Leyde. Ainsi, pour les charger il faut qu'une des deux armatures soit en communication avec le sol; on peut les décharger en mettant les deux armatures en contact ou en les touchant alternativement, etc. Ces appareils, qui furent découverts en 1746, par Musschenbroeck et Cunéus, sont principalement employés pour produire de violentes commotions ou des combustions; nous les examinerons plus tard sous ce rapport. Ils sont aussi très-commodes pour se procurer à volonté les deux électricités : pour cela on isole une bouteille de Leyde chargée, et en touchant alternativement les deux armatures, on obtient successivement les deux espèces de fluides électriques.

Dans la bouteille de Leyde, comme dans le condensateur ordinaire, l'électricité accumulée sur les deux armatures adhère au verre, de sorte que, si on pouvait enlever les deux armatures, chacune d'elles ne serait chargée que d'une très-petite quantité d'électricité. On peut facilement faire cette expérience au moyen de l'appareil fig. 539. Cette bouteille de Leyde se compose de trois vases cylindriques, qui entrent les uns dans les autres : les deux extrêmes sont en métal et forment les deux armatures; celui qui est

intermédiaire est en verre. Si, après avoir chargé la bouteille, on la place sur un isoloir, et si on enlève les deux vases intérieurs avec un corps isolant, on trouve que les deux armatures n'ont qu'une très-faible tension, et que la bouteille reprend sa charge primitive quand on remet les vases en place.

934. La charge d'une bouteille de Leyde est proportionnelle à l'étendue de la surface des deux armatures et à la tension de celle qui a été mise en communication avec la source d'électricité : la charge d'un même appareil est alors proportionnelle à sa tension. On apprécie cette tension par la distance à laquelle se fait l'explosion, car cette distance diminue à mesure que la tension est plus petite. On se sert pour cela de l'appareil fig. 540. AB est une tige mobile dans l'anneau C, et qui communique avec l'armature extérieure : on approche lentement le bouton A du bouton M, et après l'explosion on mesure la distance des deux boules.

935. L'appareil fig. 541 est un carillon à bouteille de Leyde; on en concevra facilement l'effet d'après ce que nous avons dit précédemment. Dans l'appareil fig. 542, qui produit le même effet, la bouteille de Leyde se charge par sa pointe, en la plaçant dans le voisinage du conducteur d'une machine électrique.

936. Lorsqu'une bouteille de Leyde chargée est abandonnée à l'action de l'air, l'armature extérieure communiquant avec le sol, la tension de l'autre va continuellement en diminuant, et la bouteille finit par se décharger complétement; mais, si on isole la bouteille, l'armature par laquelle elle a été chargée, étant la seule qui possède de l'électricité libre, perd d'abord seule de l'électricité; mais aussitôt que sa tension a commencé à diminuer, l'électricité de l'autre ne se trouve plus dissimulée en totalité : il s'y développe donc de l'électricité libre, et elle commence à son tour à perdre par le contact de l'air. Il est facile de voir que l'armature dont l'électricité était totalement dissimulée doit acquérir une tension croissante, jusqu'à ce qu'elle ait atteint celle de l'autre, et qu'alors ces deux tensions doivent décroître ensemble, jusqu'à ce que la totalité de l'électricité se soit dissipée. Ce fait est parfaitement confirmé par l'expérience, comme on peut le reconnaître à l'aide de l'appareil suivant.

MN (fig. 543) est une lame de verre verticale, garnie sur chaque face d'une lame d'étain et d'un petit pendule. Si, après avoir chargé cet appareil en mettant une de ses faces en contact avec le sol, et l'autre avec le conducteur d'une machine électrique, on aban-

donne l'appareil à lui-même, la communication avec le sol restant établie, le petit pendule qui se trouve placé sur l'armature possédant de l'électricité libre s'abaisse graduellement, et l'autre reste immobile. Mais, si la communication avec le sol est supprimée, le petit pendule de l'armature qui ne renfermait que de l'électricité dissimulée s'élève graduellement à mesure que l'autre s'abaisse; ils arrivent bientôt à un écart à peu près égal, et qui est environ la moitié de l'écart initial du premier : alors tous deux descendent, mais très-lentement.

937. *Piles électriques.* Lorsqu'on forme une chaîne avec plusieurs bouteilles de Leyde (fig. 544) dont l'armature extérieure de chacune communique avec l'armature intérieure de la suivante, et qu'on fait communiquer l'armature intérieure de la première avec le conducteur d'une machine électrique donnant de l'électricité positive, et l'armature extérieure de la dernière avec le sol, toutes se chargent positivement en dedans, et négativement en dehors. En effet, la charge positive intérieure de la première refoulera dans la seconde le fluide positif, tandis qu'elle attirera contre la surface du verre l'électricité négative; la seconde bouteille agira de même sur la troisième, et ainsi de suite. Il est évident que les charges iront en diminuant à partir de la première.

En désignant par V_1, V_2, V_3, etc., V_n, les électricités des armatures extérieures; par R_1, R_2, R_3, etc., R^n, celles des armatures intérieures, on aura les équations

$$\begin{array}{ll} R_1 + V_2 = 0 & R_1 + \mu V_1 = 0 \\ R_2 + V_3 = 0 & R_2 + \mu V_2 = 0 \\ R_3 + V_4 = 0 & R_3 + \mu V_3 = 0 \\ \dots\dots\dots\dots & \dots\dots\dots\dots \\ R_{n-1} + V_n = 0 & R_n + \mu V_n = 0 \end{array}$$

En combinant ces équations, on trouve

$$\begin{array}{ll} R_2 = \mu R_1 & V_2 = \mu V_1 \\ R_3 = \mu R_2 & V_3 = \mu V_2 \\ R_4 = \mu R_3 & V_4 = \mu V_3 \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ R_n = \mu R_{n-1} & V_n = \mu V_{n-1} \end{array}$$

En multipliant ces équations, il vient

$$R_n = \mu^{n-1} R_1 \quad \text{et} \quad V_n = \mu^{n-1} V_1$$

Au lieu de bouteilles de Leyde, on pourrait employer des lames de verre revêtues de lames d'étain sur les deux surfaces, et disposées comme l'indique la fig. 545; les lames en regard communiquent

par un fil métallique. En superposant une suite de condensateurs (fig. 546), on obtiendra les mêmes effets. Ces derniers appareils portent le nom de *piles électriques*.

Quand on décharge l'appareil, en mettant en communication l'armature supérieure de la première plaque avec l'armature inférieure de la dernière, on ne reçoit que la commotion résultant de la charge des deux armatures extrêmes, parce que toutes les autres électricités libres se neutralisent mutuellement.

Si, après avoir chargé un de ces appareils en le mettant en contact avec une machine donnant de l'électricité positive, on l'isole, et si on détermine à l'aide d'un petit plan d'épreuve la nature et la tension électrique libre sur les armatures, on trouve que l'appareil ne renferme que de l'électricité positive libre, dont la tension va en décroissant de la première armature à l'avant-dernière. Si on touche la première armature, l'appareil se charge dans toute son étendue d'électricité négative : car l'appareil se trouve dans le même état que si la dernière armature avait été en communication avec une source d'électricité négative, et la première en contact avec le sol. Mais si l'appareil reste longtemps exposé à l'air, la déperdition de l'électricité par le contact de l'air finit par établir, sur toutes les armatures, des tensions qui, au bout d'un certain temps, se trouvent disposées comme il suit : les tensions sont de nature différente dans les deux moitiés de l'appareil; elles sont égales sur deux armatures également éloignées des extrémités, et croissent du centre vers les extrémités, de sorte que la première et la dernière ont des tensions égales, mais de nature contraire. Si on divise la série en plusieurs parties, l'électricité dans chacune d'elles finit par se répartir de la même manière que dans la série totale. Ces résultats du calcul sont confirmés par l'expérience. (M. Biot, *Traité de Physique*, t. II.)

Nous verrons bientôt des phénomènes qui paraissent avoir beaucoup d'analogie avec ceux des piles électriques.

938. *Électroscopes.* Ces instruments ont pour objet de découvrir dans les corps de très-petites quantités d'électricité; tous sont fondés sur les attractions et les répulsions qui se manifestent dans les corps légers par les fluides électriques qu'ils renferment. Les appareils fig. 506, 508, 510 et 511, sont les électroscopes les plus simples. Pour soustraire les mouvements à l'influence de l'air, on dispose ordinairement l'appareil dans un flacon ou une cloche de verre (fig. 547 et 548). Les corps qui doivent s'écarter par l'in-

fluence électrique sont ou des brins de paille, ou de fils métalliques dont les extrémités sont garnies de boules de moelle de sureau, ou de lames d'or étroites et très-minces.

Il est indispensable que les pailles, les boules de sureau ou les lames d'or, dans leur plus grand écart, ne viennent pas toucher le verre : car elles pourraient y rester adhérentes; et elles communiqueraient d'ailleurs au verre une électricité qui se dissiperait difficilement, et troublerait longtemps les résultats. Pour éviter cet inconvénient, on emploie les dispositions représentées par les fig. 549 et 550. *a* et *b* (fig. 549) sont des boules métalliques communiquant avec le sol par les tiges qui les supportent, et contre lesquelles les petits pendules, dans le maximum de leur écart, viennent frapper en se déchargeant; *ab* et *cd* (fig. 550) sont deux petites lames d'étain collées contre la surface intérieure du verre, et qui remplissent le même objet. On augmente la sensibilité de l'instrument en plaçant les boules *a* et *b* (fig. 549) à une petite distance des feuilles d'or : elles sont alors électrisées par influence, et font diverger les feuilles d'or par des tensions électriques beaucoup plus faibles que quand elles sont très-éloignées. On peut graduer ces instruments en en construisant deux aussi semblables que possible, et partageant successivement entre eux la charge électrique d'un seul : on obtient ainsi les déviations correspondantes à des charges 1, 1/2, 1/4, 1/8, etc. Les déviations relatives à des charges intermédiaires peuvent s'obtenir par une construction graphique, et être vérifiées par d'autres expériences directes. (De Saussure.)

On adapte ordinairement aux machines électriques l'électroscope fig. 551, connu sous le nom de Henley. Il est formé d'une tige d'ébène terminée par un demi-cercle en ivoire, au centre duquel est suspendue une paille garnie à son extrémité d'une petite boule de moelle de sureau. L'électromètre de Lane (fig. 540) a pour objet de décharger une bouteille de Leyde, lorsque l'électricité a acquis une tension limitée. Il est formé d'une bouteille de Leyde posée sur un plateau métallique, surmonté d'une tige métallique verticale, traversée, à la partie supérieure et à la hauteur du bouton de la bouteille, par une tige horizontale, mobile dans une douille, et dont une des extrémités peut être amenée à une distance quelconque du bouton de la bouteille.

939. Mais, de tous les électroscopes, le seul qui soit ordinairement construit de manière à donner des indications comparables, et d'où l'on puisse déduire la mesure des tensions électriques, c'est

celui de Coulomb (fig. 552). Cet appareil est une véritable balance électrique, dans laquelle on a supprimé le tube EF (fig. 515), et dont le cylindre conducteur passe à travers l'épaisseur du verre.

940. Au moyen des électroscopes fig. 506 et 508, on reconnaît la présence de l'électricité dans un corps par le mouvement des boules vers le corps, lorsqu'on l'approche à une petite distance. Au moyen des électroscopes fig. 547, 548, 549, 550 et 551, l'électricité renfermée dans un corps que l'on approche de la boule *a* est manifestée par l'écartement des pailles ou des boules; ces effets proviennent, comme nous l'avons déjà expliqué, de la décomposition à distance du fluide électrique naturel de la partie mobile de l'électroscope. Dans l'appareil de Coulomb, l'effet provient encore de la même cause; mais il y a une double décomposition : car, en approchant le corps *cd* (fig. 552), dont on veut reconnaître l'état électrique, du conducteur *ab*, l'électricité mise en liberté au point *b* par influence agit à son tour de la même manière sur le disque de clinquant.

941. L'usage de la balance de Coulomb, telle que nous venons de la décrire et telle qu'il l'a employée, présente un grand inconvénient : à l'instant où elle est chargée, le levier mobile est repoussé vivement, et fait de nombreuses oscillations avant de se fixer. La durée totale de ces oscillations est variable avec la charge; et, la perte d'électricité par l'air et les supports diminuant la charge des boules d'une quantité variable, il en résulte que les expériences sont bien incertaines quand l'air n'est pas très-sec.

Quand on a pour objet l'estimation ou la mesure de l'intensité d'une source continue, on peut faire disparaître les inconvénients que nous venons de signaler, en établissant une communication des boules fixes et mobiles avec la source : on obtient alors des déviations permanentes, et il n'y a plus d'autres causes d'erreur que la variation de conductibilité de l'air. Différentes dispositions de l'appareil produisent cet effet. Supposons d'abord qu'il ne s'agisse que de constater la tension électrique d'une source très-faible, et le sens des variations qu'elle éprouve, on emploiera la disposition fig. 553. Un tube de verre recourbé à angle droit s'élève de quelques centimètres au-dessus du centre d'un plateau de bois PQ; ce tube est traversé par un fil de cuivre soudé à une tige de cuivre AB, placée horizontalement. Au centre de cette tige se trouve une pointe fine verticale, supportant un fil métallique très-fin, recourbé dans un plan vertical, de manière que ses deux extrémités se trouvent à la hauteur de la tige AB, mais l'une

d'un côté, et l'autre de l'autre; au centre de ce fil existe une très-petite aiguille aimantée, destinée à lui donner une faible force directrice. Aux extrémités C et D se trouvent deux fils verticaux de gomme laque qui parcourent un cadran divisé. En tournant tout l'appareil de manière que la tige et le fil soient en contact, l'aiguille ayant la position qu'elle prendrait si elle était libre, et en mettant l'extrémité S du fil en contact avec une source d'électricité, l'aiguille CD sera déviée d'une manière permanente, et d'autant plus que la source sera plus énergique. Si on voulait rendre l'appareil encore plus sensible, il faudrait suspendre le levier mobile au moyen d'un fil de cocon dédoublé et de 20 à 30 centimètres de longueur; mais, pour que l'électricité parvînt à ce levier comme à la tige fixe, il faudrait y fixer au-dessus de la pointe un petit godet renversé, dans lequel elle pénétrerait sans le soutenir : par le contact, qui s'établirait naturellement, l'électricité se communiquerait au levier mobile. Pour obtenir des mesures avec ces appareils, on pourrait s'y prendre de deux manières : 1° en faisant tourner le levier AB dans le sens de la déviation, de manière à le maintenir à la même distance angulaire du fil : la force électrique ferait équilibre dans chaque opération à celle de l'aiguille pour revenir à sa position primitive, force qui, comme nous l'avons vu, est proportionnelle au sinus de la déviation sur la direction primitive; 2° on pourrait suspendre le levier mobile par un fil métallique, et employer la torsion comme dans la balance de Coulomb; mais il faudrait séparer le fil de suspension du levier mobile par un fil de gomme laque.

942. Au moyen de l'un quelconque de ces appareils, on peut facilement reconnaître l'espèce d'électricité libre que possède un corps. En effet, pour les électroscopes fig. 506 et 508, on commencera par les isoler en les plaçant sur une plaque de verre ou de résine, après quoi il faudra leur donner une petite quantité d'électricité positive ou négative. Pour cela on approchera de la boule de l'électroscope un corps possédant une électricité connue, par exemple un bâton de cire d'Espagne frotté : l'électricité négative passera dans la partie de l'appareil la plus éloignée, et l'électricité positive occupera la partie opposée. Si alors, avant de retirer le bâton de cire d'Espagne, on touche le support, l'appareil se trouvera électrisé positivement, et, suivant que le corps dont on veut reconnaître l'espèce d'électricité exercera une attraction ou une répulsion, on en conclura la nature de son électricité. En approchant de même un

corps possédant une électricité connue des électroscopes fig. 547 et 549, et en touchant le bouton avant de retirer le corps, on donnera à l'appareil une électricité contraire qui fera écarter les fils; et, suivant que cet écart sera augmenté ou diminué par la présence d'un nouveau corps, il possédera une électricité de même nature ou de nature différente de celle du corps qui a servi d'abord. Il est évident qu'il faudrait opérer de la même manière pour l'électroscope de Coulomb.

Nous venons de dire qu'au moyen d'un électroscope chargé d'électricité, on pouvait reconnaître l'espèce d'électricité d'un corps, en l'approchant du conducteur qui supporte les pendules; que, si la divergence était augmentée, le corps possédait la même espèce d'électricité que l'appareil, et que, si la divergence diminuait, il était chargé d'une électricité contraire. La première partie de cette proposition est exacte; mais la seconde ne l'est pas toujours, car un corps à l'état naturel est électrisé par influence, et pourrait produire le même effet. Alors, pour que la diminution de divergence soit une preuve décisive, il faut qu'elle soit très-grande, et qu'en approchant toujours davantage le corps, la divergence devienne nulle, et qu'ensuite il se manifeste de nouveau une répulsion.

943. *Électromètre condensateur.* Cet instrument, beaucoup plus sensible que ceux dont nous venons de parler, a été imaginé par Volta pour découvrir les plus faibles traces d'électricité. Il se compose (fig. 554) d'un électroscope à feuilles d'or, surmonté d'un condensateur, dont le plateau inférieur est garni d'une tige *mn*, terminée par une boule *o*. On fait communiquer le plateau supérieur avec le sol, et la boule *o* avec le corps électrisé : la charge que prend le plateau est dissimulée; alors, en plaçant le corps dans les mêmes circonstances où il avait d'abord acquis sa tension électrique, et en répétant l'opération, on pourra accumuler une quantité croissante d'électricité dans les plateaux; en les séparant elles deviendront libres, et celle du plateau inférieur, qu'on désigne sous le nom de *collecteur*, fera diverger les feuilles d'or, et d'autant plus que les contacts auront été plus multipliés. Il est évident que si la boule *o* était mise en communication avec une faible source d'électricité, le condensateur prendrait, par un seul contact, le maximum de charge, parce que le plateau collecteur se mettrait immédiatement en équilibre de tension avec la source.

Quand l'air est humide, l'électricité se perd promptement, et il

serait impossible de faire des expériences comparables, si l'on n'avait soin de dessécher l'air intérieur et extérieur de l'électroscope avec des matières très-hygrométriques, telles que la chaux vive, le chlorure de calcium, etc. La meilleure disposition est celle représentée fig. 555, qui est due à M. Pouillet. La cloche de l'électroscope est environnée d'une cage carrée, reposant sur le même plateau; on met une substance hygrométrique dans un tiroir placé dans le support MN qui communique avec la cloche intérieure et avec l'espace qui la sépare de la cage extérieure.

944. *Électromètre condensateur à trois plateaux.* Cet instrument, que j'ai imaginé pour rendre sensibles des effets qui sont inappréciables avec l'électromètre condensateur ordinaire, se compose de trois plateaux en verre dorés et superposés; d'une cage en glace qui renferme les lames d'or; d'un trépied garni de vis de rappel; d'un voyant et d'une partie de cercle divisé. Il est représenté en élévation, en coupe et en projection horizontale, fig. 987, 988 et 989.

Le plateau inférieur A communique métalliquement avec les lames d'or, comme dans les condensateurs ordinaires, et il n'est verni qu'à sa surface supérieure. Le plateau B, placé au-dessus, est garni d'un manche isolant D; il est verni sur ses deux faces, mais non à sa circonférence. Enfin le plateau C est percé à son centre d'un orifice à travers lequel passe la tige qui supporte le plateau B; il est garni d'un cylindre de verre F qui sert à le soulever, et il est verni seulement sur sa surface inférieure. Ces plateaux sont en glace dépolie; ils ont été dorés en appliquant l'or sur le verre, après l'avoir humecté seulement avec l'haleine; et ils ont été recouverts à chaud d'un grand nombre de couches de vernis à la gomme laque. Mais comme il est important que les surfaces vernies soient bien planes, et qu'elles ne restent jamais telles quand le nombre des couches est considérable, on polit la surface vernie avec du papier couvert d'émeri très-fin, et on lui rend son brillant en la faisant chauffer, ou en la recouvrant d'une nouvelle couche de vernis.

Les lames d'or R, S, qui communiquent avec le plateau A, sont minces, étroites, parallèles et placées dans une cage en glace assez grande pour que ces lames dans leur plus grand écart ne la rencontrent pas. Sur le fond en cuivre de la cage sont fixées deux lames de cuivre verticales et parallèles, destinées à augmenter par leur influence la divergence des lames. La cage renferme une boîte pleine de chlorure de calcium.

La cage repose sur un support FGH garni de vis au moyen desquelles on peut la rendre horizontale. A une des extrémités de ce support, se trouve une tige terminée par une plaque circulaire I, percée à son centre d'un très-petit trou. L'autre extrémité porte un secteur circulaire divisé en degrés. On règle la hauteur de la pièce qui porte la division et du centre de la plaque I, de manière que la ligne qui joint les deux centres passe par l'extrémité supérieure des deux lames d'or.

Voici maintenant la manière de se servir de cet instrument. On touche le plateau supérieur avec un corps communiquant avec une faible source électrique et le bord du second plateau avec le doigt; on supprime les contacts; on soulève le plateau supérieur et on touche le plateau inférieur; alors on remet le plateau supérieur en place, et on recommence un certain nombre de fois la même série d'opérations; enfin on soulève à la fois les deux plateaux supérieurs au moyen de la tige D : les feuilles d'or éprouvent une divergence d'autant plus grande que le nombre des opérations a été plus considérable.

Ce phénomène est facile à comprendre : quand on met le premier plateau en contact avec la source d'électricité, et le second avec le doigt, tout se passe comme dans le condensateur ordinaire : les deux plateaux se chargent d'électricités contraires, mais elles sont dissimulées. Lorsqu'on soulève le premier plateau, ces électricités deviennent libres; mais en touchant avec le doigt le troisième plateau, ce dernier se charge et dissimule la charge du second; si alors on recommence, on fera passer la nouvelle charge dans le troisième et ainsi de suite. Il est évident que si l'électricité du plateau supérieur ne se perdait pas, il suffirait de le toucher une seule fois avec le corps; mais, pour éviter l'influence de cette perte, il vaut mieux le toucher à chaque opération.

945. *Effets produits par la neutralisation des électricités accumulées.* La plupart des effets que nous allons décrire peuvent s'obtenir avec une simple bouteille de Leyde, dont on fait communiquer les armatures par le corps à travers lequel la décharge doit passer. Mais, pour produire de très-grands effets, on réunit plusieurs bouteilles de Leyde sur un plateau métallique, de manière à faire communiquer leurs armures extérieures, et on réunit par des tringles leurs armatures intérieures (fig. 556). Cette disposition porte le nom de *batterie électrique*. On peut aussi former des batteries électriques d'une manière plus simple, en prenant des lames de verre à vitre que l'on recouvre des deux côtés de lames d'étain jusqu'à 7 ou

8 centimètres des bords, les plaçant les unes sur les autres, et faisant communiquer entre elles, par des fils métalliques placés de deux côtés opposés, les armatures de rangs pairs et celles de rangs impairs.

946. *L'électricité suit toujours de préférence les bons conducteurs.* Ainsi on peut impunément décharger une bouteille de Leyde, et même une batterie, au moyen d'un fil de cuivre que l'on met en communication avec les deux armatures et que l'on tient à la main, ou qui entoure le corps; pourvu toutefois que le conducteur ait des dimensions suffisantes : car, dans le cas contraire, une partie de la décharge se ferait à travers les organes. L'eau salée conduit mieux l'électricité que nos organes, et ces derniers mieux que l'eau pure : aussi quand on met les deux armatures d'une batterie en communication à la fois par de l'eau et par les mains, on reçoit une forte commotion si l'eau est pure, et on n'en éprouve aucune si l'eau est salée. Priestley, d'après des expériences que nous rapporterons bientôt, range les métaux dans l'ordre suivant, sous le rapport de leur conductibilité : *or, argent, cuivre, laiton, fer.* Ce même physicien a constaté que la chaleur augmentait la conductibilité des corps mauvais conducteurs et diminuait celle des bons conducteurs. Quand on établit la communication entre les deux armatures par plusieurs corps dont les facultés conductrices diffèrent peu, ou quand, la différence étant très-grande, celui qui conduit le mieux ne pourrait pas décharger instantanément la batterie, l'électricité se distribue entre les conducteurs suivant des lois encore inconnues, mais toujours de manière que la plus grande quantité d'électricité passe par les corps qui conduisent le mieux; dans ce cas, la conductibilité des corps dépend non-seulement de celle de la matière qui les constitue, mais encore de leurs dimensions. Il est probable que pour les corps cylindriques, propageant l'électricité dans le sens de leur longueur, la faculté conductrice est proportionnelle à celle de la matière, à la surface de la section perpendiculaire à l'axe et en raison inverse de la longueur.

947. *Choc latéral.* Lorsqu'un conducteur de dimensions suffisantes établit la communication entre les deux armatures d'une batterie, le courant qui le traverse agit pendant la courte durée de son trajet sur les corps environnants, il les électrise par influence, et la recomposition rapide du fluide neutre produit souvent de légères commotions. Ce phénomène, qui est désigné sous le nom de *choc latéral,* peut être constaté en plaçant dans le voisinage d'une batterie, un conducteur en communication avec le sol et garni d'un

petit électroscope à pendule : par la décharge de la batterie, le petit pendule est vivement agité.

948. *Effets physiologiques.* Les effets produits sur nos organes par la décharge d'une bouteille de Leyde sont d'autant plus énergiques que les armatures ont une plus grande surface, et que la charge est plus forte. L'effet peut se transmettre à travers une chaîne composée d'un grand nombre de personnes qui se tiennent par les mains : chacune d'elles éprouve la même commotion. Avec de puissantes batteries, on parvient à tuer des animaux, même d'une grande taille : il serait donc très-dangereux d'en recevoir la décharge.

949. *Effets physiques produits par la décharge d'une batterie dans les corps mauvais conducteurs, ou par leur nature, ou par leurs dimensions.* Quand on fait passer la décharge d'une batterie à travers un corps mauvais conducteur, par l'une des deux circonstances énoncées, le corps peut être percé, déchiré ou disséminé; et quand il résiste à cette action mécanique, il s'échauffe plus ou moins, souvent de manière à rougir, à se liquéfier, ou à brûler, Avant de citer des faits particuliers, nous décrirons l'appareil dont on se sert pour faire passer la décharge d'une batterie à travers un corps quelconque.

Cet appareil, connu sous le nom d'*excitateur universel*, se compose (fig. 557) de deux tiges *ab* et *a'b'*, montées à charnière sur des colonnes isolantes *cd* et *c'd'*; elles entrent à frottement libre dans les douilles *e*, *e'*, afin que leurs extrémités puissent être amenées à une distance quelconque. Le support isolant *mn*, que l'on peut placer à différentes hauteurs, est destiné à recevoir le corps à travers lequel on veut faire passer la décharge; on met ses extrémités en contact avec celles des tiges *ab* et *a'b'*. Une d'elles est en communication permanente avec une des armatures de la batterie, et, à l'aide de l'excitateur fig. 556, on met l'autre armature en contact avec l'autre tige.

950. Lorsqu'on place une carte obliquement entre deux conducteurs terminés par une pointe (fig. 558), et qu'on fait passer entre les pointes la décharge d'une bouteille de Leyde, la carte se trouve percée d'un trou très-fin, mais qui n'est point au milieu de l'espace qui sépare les deux pointes; il est beaucoup plus rapproché de la pointe communiquant avec l'armature chargée d'électricité négative. M. Trémery, à qui on doit cette observation, a remarqué qu'à mesure que l'on diminuait la pression de l'air, le trou de la carte se

rapprochait du milieu de l'intervalle des deux pointes. Ce phénomène est resté jusqu'ici sans explication.

951. On peut aussi, à l'aide de la décharge d'une bouteille de Leyde, percer une lame de verre. On se sert pour cet objet de l'appareil fig. 559. *ab* et *cd* sont deux supports en verre réunis par la traverse horizontale *ef*, à travers laquelle passe le conducteur à pointe *mn*; *ghki* est un cylindre de verre qui enveloppe l'autre conducteur à pointe *m'n'*, et supporte la lame de verre *xy*. On met une goutte d'huile sur la lame de verre, en face des pointes, et les deux conducteurs en communication avec les armatures d'une forte bouteille de Leyde.

En remplaçant la lame de verre par une lame de pierre, l'étincelle la brise dans plusieurs directions. Il en est de même d'une lame de bois perpendiculaire à la direction des fibres. Si on fait passer la décharge à travers un tube de verre très-capillaire plein de mercure, le tube se brise, si la décharge est assez forte.

952. Quand l'étincelle passe à travers l'air ou un gaz quelconque, les molécules de ces corps sont fortement ébranlées; pour constater ce fait, on peut employer l'appareil fig. 559 A, qui est dû à Kinnersley. Il est composé d'un cylindre de verre fermé à chaque extrémité par une virole en cuivre, traversée par une tige terminée par un bouton; le cylindre est garni, à sa partie inférieure, d'un tube *ab*, ouvert par le haut, qui s'élève parallèlement au cylindre; l'appareil est plein d'air ou du gaz sur lequel on veut opérer, et renferme une certaine quantité d'un liquide coloré. Lorsqu'on fait passer une étincelle électrique entre les deux boules, le liquide s'élève dans le tube *ab* à une hauteur d'autant plus grande que l'étincelle est plus forte. On pourrait disposer l'appareil d'une manière plus simple. *ab* (fig. 560) est un tube de verre capillaire, ouvert à sa partie supérieure *a*, renfermant un index de mercure *m*, et communiquant, par le bas, avec un tube d'un plus grand diamètre, percé latéralement de deux ouvertures, dans lesquelles sont mastiquées deux tiges métalliques terminées par des boules : lorsqu'une étincelle traverse l'intervalle des deux boules extérieures, l'index *m* éprouve une vive agitation.

953. Si l'on place une feuille d'or très-mince entre deux plaques de verre, et qu'on fasse passer la décharge à travers la lame d'or, on obtient une poudre violette, qui n'est autre chose que de l'or très-divisé, et non de l'oxyde : car, à la température que l'or a dû acquérir, l'oxyde eût été réduit, s'il s'était formé. Cette expé-

rience se fait ordinairement de la manière suivante : sur un carton découpé on place une feuille d'or, au-dessous un ruban de soie blanche; on serre le tout fortement entre deux planches, on fait passer une forte décharge à travers l'or, et on trouve sur le ruban de soie une empreinte violette de la découpure.

954. Fusinieri a fait l'observation très-curieuse qu'un courant électrique peut transporter des matières solides à travers d'autres corps solides. Par exemple, si on place un disque d'argent poli à égale distance d'une boule d'or qui communique avec l'armature intérieure d'une petite batterie, et d'une boule d'argent qu'on met en contact avec l'armature extérieure, on observe, après la décharge, deux taches d'or égales en diamètre sur les deux faces du disque d'argent. D'autres métaux sont également transportés par l'étincelle et viennent se déposer sur les surfaces des corps qu'elle rencontre, tantôt à l'état métallique, tantôt à l'état d'oxyde.

955. Quand les corps à travers lesquels on fait passer la décharge sont bons conducteurs, et ont des dimensions très-grandes, perpendiculairement à la direction du courant, par exemple quand ce sont des fils métalliques d'une grande section, ils n'éprouvent aucune modification; mais, si on diminue progressivement leur section, on s'aperçoit que, pour les mêmes décharges, ces fils s'échauffent d'autant plus qu'ils ont un plus petit diamètre; et quand leur ténuité est très-grande, ils peuvent s'échauffer jusqu'au rouge, et brûler, s'ils sont combustibles. Les fils métalliques de même longueur et de même diamètre s'échauffent inégalement par des décharges électriques égales. L'ordre des métaux rangés suivant leur faculté d'être échauffés est inverse de celui où ils sont rangés suivant leurs facultés conductrices. Nous reviendrons sur ce sujet à l'occasion des courants électriques.

Tous les phénomènes physiques que nous venons de décrire paraissent dus au flux d'électricité qui se trouve arrêté par le défaut de conductibilité du corps, soit en raison de sa nature, soit en raison de ses dimensions. D'après cela, la conductibilité n'a rien d'absolu; elle dépend à la fois de la nature du corps, de ses dimensions, et de la quantité d'électricité qui doit passer : un même corps conduit d'autant mieux que ses dimensions sont plus petites dans la direction de la transmission et plus grandes dans la direction perpendiculaire; et pour un même corps, quelles que soient sa nature et ses dimensions, on conçoit qu'il doit exister une charge pour la-

quelle il cesserait, en partie du moins, d'être conducteur. Ces dernières observations sont parfaitement d'accord avec les résultats des expériences de Coulomb sur les corps isolants, et auraient pu s'en déduire.

M. E. Becquerel a remarqué que, quand on place la pile de l'appareil de M. Melloni à une petite distance d'une étincelle électrique provenant de la décharge d'une forte batterie, l'aiguille du rhéomètre reste immobile. Cette absence d'effet est attribué avec raison à ce que l'étincelle à une trop courte durée pour que ses rayons calorifiques puissent échauffer l'extrémité de la pile.

956. *Effets chimiques.* Lorsqu'on place sur une lame de verre un petit morceau de papier de tournesol humide, qu'on fait communiquer une des extrémités avec le conducteur positif de la machine, et l'autre par un fil avec le sol ou avec les coussins, ou qu'on le met en contact avec un fil isolé terminé par une pointe, le papier de tournesol est rougi au point où il reçoit l'électricité positive. Si, au lieu du papier de tournesol, on emploie du papier coloré par du sirop de violette, il rougit à une extrémité et verdit à l'autre. Si l'on place sur une lame de verre, à la suite les uns des autres, de petites losanges de papier coloré avec du sirop de violette humide, et qu'on fasse communiquer l'extrémité du premier losange avec le conducteur positif, et l'extrémité du dernier avec le sol, ou avec le frottoir, ou avec une pointe isolée, toutes les extrémités des losanges qui sont tournées vers le conducteur positif sont rougies, et toutes les autres sont verdies. En remplaçant chaque losange par deux triangles, l'un de papier de tournesol, l'autre de papier de curcuma, humides et réunis par leur base, tous les triangles de papier de tournesol étant d'un même côté, et le premier communiquant avec le conducteur positif, tous les triangles sont rougis à leur sommet. Or il résulte des propriétés bien connues des diverses matières colorantes employées, que les changements de couleur observés aux pointes dirigées vers le conducteur positif sont dus à la présence d'un acide, et que les changements aux points opposés sont dus à la présence d'un alcali : par conséquent, on doit nécessairement admettre que l'électricité, en parcourant les bandes de papier humide et coloré, a décomposé les sels qu'elles renferment; que les acides résultant de cette décomposition ont été portés vers le conducteur positif, les alcalis vers l'extrémité opposée, et que là, par leur action sur la matière colorante, ils ont produit les changements observés.

On peut d'ailleurs reconnaître par des expériences directes qu'un courant électrique jouit de la propriété de décomposer les sels : en effet, si on prend deux fils d'argent terminés par des pointes aiguës, et qu'après avoir entouré les fils avec de la cire, jusqu'aux extrémités, on les mette en communication avec les deux conducteurs d'une machine de Nairne, et qu'on plonge les pointes dans une dissolution d'un sel de cuivre, en très-peu de temps on reconnaît que la pointe d'argent qui communique avec le conducteur négatif est couverte de cuivre.

957. Lorsqu'on fait passer une forte décharge électrique à travers un fil de laiton très-fin, on trouve de l'oxyde de zinc et de l'oxyde de cuivre isolés : par conséquent, ces métaux ont été séparés avant leur oxydation. Quand on place dans un tube de verre des oxydes d'or, d'argent, d'étain, ou du sulfure de mercure, et qu'on fait passer dans le tube une forte décharge, les oxydes sont réduits et le sulfure est décomposé.

On peut aussi décomposer les huiles et l'éther par une série d'étincelles électriques : pour cela, on remplit d'huile ou d'éther une petite cloche reposant sur du mercure, et dont la partie supérieure est traversée par un fil de platine qui descend jusqu'à une petite distance de la surface du mercure. En mettant le fil en communication avec le conducteur d'une machine, et le mercure en contact avec le sol, les étincelles qui passent, de l'extrémité du fil au mercure, décomposent le liquide; les huiles donnent de l'hydrogène carboné, de l'hydrogène et de l'oxygène en diverses proportions.

958. En faisant passer des étincelles électriques à travers certains gaz, on parvient à les décomposer. L'*hydrogène carboné*, l'*acide sulfhydrique*, l'*ammoniaque*, l'*hydrogène phosphoré*, l'*acide chlorhydrique* et le *protoxyde d'azote*, le sont en totalité et dans leur éléments simples. L'*acide carbonique* est décomposé, en partie seulement, en oxygène et oxyde de carbone; le *deutoxyde d'azote* en acide nitreux et azote; le *gaz nitreux* en acide azotique et azote.

959. Quand un mélange de différents gaz qui peuvent se combiner est traversé par une seule étincelle, la combinaison a toujours lieu, si les gaz sont dans des proportions qui diffèrent peu de celles dans lesquelles ils se combinent; la présence d'un gaz étranger n'a point d'influence, pourvu qu'il soit en petite proportion.

Une longue série d'étincelles électriques qui traverse l'air atmo-

sphérique, en diminue le volume, et il se forme une petite quantité d'acide azotique.

960. En faisant passer de violentes décharges électriques à travers l'eau, les explosions sont accompagnées d'étincelles, et une certaine quantité d'eau est décomposée. Wollaston est parvenu à produire la décomposition de l'eau en conduisant de faibles courants électriques dans ce liquide par des fils très-fins terminés par des pointes aiguës et isolées de manière à ne pouvoir perdre leur électricité que par les extrémités de ces pointes. On conçoit qu'une quantité d'électricité même très-faible, qui se porte au sommet de la pointe, et dont l'énergie s'exerce tout entière contre la seule molécule d'eau qui la touche, doit produire un effet beaucoup plus grand que quand l'électricité se dégage par une grande surface.

On prend un fil d'or très-fin, et, après lui avoir donné une pointe aussi aiguë que possible, on l'insère dans un tube capillaire de verre, on chauffe ce tube assez pour le souder à la pointe et la recouvrir bien complétement; on use ensuite par le frottement l'extrémité jusqu'à ce que, avec une loupe, on puisse découvrir l'or qui commence à se faire jour. Alors, en plongeant cette extrémité dans de l'eau qui est en communication avec le sol, et faisant passer sur l'autre extrémité des étincelles partant du conducteur d'une machine électrique, à chaque explosion on voit des bulles de gaz se dégager de la pointe; la force de l'étincelle nécessaire pour produire ce phénomène dépend de la finesse de la pointe. Wollaston a trouvé qu'une étincelle qui se manifeste à une distance de 1/8 de pouce suffisait quand le diamètre de l'extrémité de la pointe ne surpassait pas $\frac{1}{100}$ de pouce, et qu'une étincelle faisant explosion à une distance de $\frac{1}{20}$ de pouce suffisait pour décomposer l'eau quand le diamètre de la pointe était à peu près de $\frac{1}{2500}$ de pouce.

Afin d'essayer jusqu'à quel degré la force de l'étincelle électrique pourrait être réduite par une diminution proportionnée dans l'extrémité du fil, Wollaston introduisit dans un tube capillaire une solution d'or dans l'eau régale, et, en chauffant le tube, il fit évaporer l'acide. Il resta une couche d'or très-mince qui garnissait l'intérieur du tube; alors en chauffant le tube jusqu'au point de le ramollir, il se forma un fil d'or très-mince au milieu de la substance du tube. En plongeant une des extrémités du tube dans de l'eau, et en mettant l'autre extrémité en contact avec le conduc-

teur d'une machine électrique, l'eau fut décomposée par le courant électrique, quoiqu'il ne se produisît point d'étincelle visible dans tout le trajet.

961. *Lumière électrique.* La combinaison des deux électricités dans un milieu non conducteur et l'écoulement de l'un d'eux dans l'air sont toujours accompagnés de lumière. C'est Otto de Guericke qui observa le premier l'étincelle électrique. La lumière paraît différer pour les deux fluides : car, lorsqu'un conducteur armé d'une pointe est chargé d'électricité positive, on aperçoit à l'extrémité de la pointe une belle aigrette, tandis que, s'il est chargé d'électricité négative, on ne voit qu'un point lumineux.

962. *Vitesse de l'électricité.* L'électricité parcourt les corps bons conducteurs avec une rapidité extrême. En 1745 et 1750, on fit en Angleterre des expériences pour apprécier la vitesse avec laquelle l'électricité se transmet à travers les métaux, et on reconnut que des fils métalliques isolés, de plus d'une lieue de longueur, transmettaient instantanément l'électricité.

963. Quand l'électricité traverse l'intervalle qui sépare deux conducteurs, on aperçoit une ligne droite continue, en raison de la durée de la sensation. M. Wheatstone a essayé de mesurer la vitesse avec laquelle l'étincelle traverse l'espace, par le moyen que nous allons rapporter. Une boule métallique fixe était mise en communication avec le conducteur d'une machine électrique ; une autre boule, communiquant avec le sol, passait rapidement sous la première à une distance de quatre pouces. Il est évident que, si la vitesse de la dernière boule était comparable à la vitesse de l'électricité, la traînée lumineuse aurait dû paraître oblique, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, suivant le sens du mouvement de la boule mobile; mais l'expérience a démontré que, quelle que fût la vitesse, l'étincelle avait la même apparencee que quand les deux conducteurs étaient en repos. Pour mesurer la vitesse de l'électricité dans les corps conducteurs, M. Wheatstone s'est servi d'un miroir plan, vertical, mobile autour d'un axe vertical parallèle à l'étincelle. Il est facile de voir que, dans un semblable miroir, un point lumineux fixe produit une image circulaire dont le rayon est égal à la distance du point lumineux à l'axe de rotation, et que, la vitesse angulaire de l'image étant double de celle du miroir, la circonférence entière sera décrite pendant une demi-révolution du miroir; et si le revers du miroir est aussi une surface réfléchissante, l'image parcourra deux circonférences entières pendant cha-

que révolution complète du miroir. Il résulte évidemment de là que, si l'étincelle a une durée appréciable, on verra un arc lumineux dans le sens du mouvement, et dont l'étendue dépendra de la durée de l'étincelle et de la vitesse de rotation du miroir. Supposons maintenant qu'on place devant le miroir le conducteur représenté fig. 562 interrompu aux points *a*, *b* et *c*; si on met les extrémités *p* et *q* en communication avec les armatures d'une bouteille de Leyde, l'étincelle se manifestera au point *b* après que l'électricité aura parcouru le chemin *amb*; et par conséquent, si l'électricité parcourt ce chemin dans un temps appréciable, les trois arcs lumineux qu'on verra dans le miroir ne devront pas partir de la même ligne verticale : le premier et le dernier devront être un peu plus avancés dans le sens du mouvement du miroir. Dans une des expériences, l'intervalle angulaire des origines des deux arcs extrêmes et de celui du milieu correspondait à un millionième de seconde; et comme le conducteur avait 0,288 milles de longueur, il en résultait une vitesse de 288000 milles par seconde, vitesse qui surpasse celle de la lumière dans le vide.

964. Si on prend un tube de verre terminé par deux appendices conducteurs, qu'après y avoir fait le vide on le mette en contact, par une de ses extrémités, avec une machine électrique, et qu'on fasse communiquer l'autre avec le sol, toute sa capacité intérieure se trouve uniformément éclairée; mais si on approche un corps conducteur, l'électricité se porte vers lui, et la lumière acquiert plus d'éclat dans les parties du tube voisines du corps conducteur. Cet effet s'explique facilement, en observant que le courant électrique décompose par influence l'électricité naturelle du conducteur, et que celle qui s'accumule dans la partie la plus voisine du tube réagit sur le courant électrique qui le traverse.

965. Pour observer les variations que présente la lumière électrique suivant la force élastique de l'air dans lequel elle se manifeste, on emploie l'appareil fig. 561, qui est composé d'un ballon de verre à robinet, garni de deux tiges à boules que l'on peut rapprocher plus ou moins, une d'elles pouvant glisser dans une boîte à cuir. En dilatant l'air du ballon à l'aide d'une machine pneumatique, on observe qu'à mesure que sa densité diminue, la lumière électrique occupe un espace terminé aux deux boules, et de plus en plus dilaté vers le milieu; et que dans le vide la lumière occupe toute la capacité du ballon. Quand l'espace lumineux augmente, l'intensité de la lumière s'affaiblit. On n'a fait aucune expérience

pour déterminer le rapport, entre le volume occupé par la lumière et son intensité; il serait possible que la diminution de lumière provînt uniquement de l'accroissement de volume. Cette conjecture pourrait être vérifiée en se plaçant à des distances du ballon telles que l'espace lumineux fût aperçu sous le même diamètre apparent : l'éclat devrait rester constant, si notre supposition est vraie.

966. On a expliqué la lumière électrique par la compression subite que l'air éprouve, compression qui produirait un dégagement de chaleur et de lumière d'autant plus grand que l'air serait plus dense. Le choc de l'air n'est point cependant une explication suffisante de la lumière électrique, puisque cette lumière se manifeste encore dans le vide barométrique, et à une température inférieure à celle où il paraît que les vapeurs mercurielles cessent d'exister. La lumière électrique dépend probablement de la nature de ce fluide; mais, dans l'état actuel de la science, il est impossible de se prononcer sur la cause qui la produit.

967. Par des moyens photométriques dont nous parlerons plus loin, M. Masson a trouvé pour l'intensité de la lumière qui accompagne la décharge d'un condensateur, les lois suivantes : ces intensités sont proportionnelles aux carrés des distances d'explosion, proportionnelles aux surfaces des condensateurs, et en raison inverse des épaisseurs des lames isolantes.

La teinte de la lumière de l'étincelle électrique varie avec la nature du gaz dans lequel l'explosion a lieu, avec sa force élastique et avec la nature des corps entre lesquels l'explosion s'effectue. L'étincelle est blanche dans l'acide carbonique, rougeâtre dans l'hydrogène, blanche dans l'air comprimé, rougeâtre dans l'air raréfié, d'un vert brillant dans la vapeur de mercure, et, en y ajoutant une quantité croissante d'air, la teinte passe successivement au vert de mer, au bleu et au pourpre. Les étincelles tirées avec des boules de bois et d'ivoire ont une teinte cramoisie; avec du cuivre argenté, elles ont une teinte verte; avec du charbon, la teinte est jaune : Fusinieri pense que ces variations de couleur de l'étincelle électrique proviennent de l'incandescence des molécules pondérables entraînées par l'électricité.

968. Nous terminerons ce qui est relatif à la lumière électrique par la description de quelques expériences fort curieuses, et qui sont fondées sur la rapidité du mouvement de l'électricité. Lorsqu'on place une série de conducteurs à la suite les uns des autres, si l'intervalle qui les sépare est très-petit, en mettant les ex-

trêmes en contact avec les armatures d'une bouteille de Leyde, l'étincelle électrique se manifeste en même temps dans tous les intervalles ; c'est sur ce principe que sont fondés les appareils électriques qu'on désigne sous le nom de *tubes étincelants*, *carreaux étincelants*, etc.

Les tubes étincelants (fig. 563) sont des tubes recouverts à leur surface de petites lames d'étain ayant la forme d'un losange, et disposées suivant une hélice ; leurs sommets sont en regard, et très-voisins. En mettant les extrémités du tube, qui sont garnies d'appendices conducteurs, en contact avec les armatures d'une bouteille de Leyde, ou seulement en approchant une des extrémités du conducteur d'une machine électrique, l'autre communiquant avec le sol, l'étincelle passe simultanément dans les lames et dessine une hélice. On dispose aussi les petites lames d'étain sur des plaques de verre, de manière à former, par les intervalles qui les séparent, des dessins quelconques, qui se trouvent alors illuminés par le passage d'une étincelle électrique (fig. 564).

Le *carreau magique* est une lame de verre dont une des faces est recouverte d'une lame d'étain, et dont l'autre est recouverte d'un vernis mêlé avec une poudre métallique. Cet appareil se charge comme un condensateur ; en le déchargeant, l'étincelle serpente dans tous les sens, en imitant l'effet de la foudre.

§ 3. *Développement de l'électricité par la pression.*

969. La première expérience qui conduisit à reconnaître dans la pression une cause de développement d'électricité est due à Libes. Ce physicien découvrit qu'un disque métallique isolé, pressé contre du taffetas gommé, prend l'électricité négative, et le taffetas l'électricité positive; par la pression avec frottement, le taffetas prend au contraire l'électricité négative. Haüy constata ensuite que le spath d'Islande et quelques autres substances minérales jouissaient de la propriété de s'électriser par la pression entre les doigts. M. Becquerel, qui depuis s'est occupé d'une manière spéciale de ces phénomènes, est parvenu à des faits généraux que nous allons rapporter.

970. Quand deux corps de nature quelconque dont l'un est élastique, sont pressés l'un contre l'autre, ils se constituent dans deux états électriques différents; mais ils ne sortent de la compression avec de l'électricité libre, qu'autant que l'un d'eux n'est pas un bon

conducteur. La tension électrique, après la séparation, dépend de la conductibilité des deux corps et de la vitesse de séparation : car, pendant la durée de la pression, les deux couches électriques séparées étant en équilibre, comme M. Becquerel s'en est assuré, l'équilibre ne subsiste que par le seul fait de la pression; si on la diminue lentement, les électricités qui ont été séparées se combineront de nouveau avec d'autant plus de facilité que la séparation sera plus lente et que les fluides se mouvront plus aisément dans les corps : aussi on obtient toujours une tension électrique d'autant plus grande que la séparation a été plus rapide.

L'eau hygrométrique qui recouvre la surface des corps empêche souvent l'électricité de rester après la séparation, probablement parce qu'elle les rend bons conducteurs; aussi il faut avoir soin de sécher et d'essuyer les corps avant de les soumettre à l'expérience. M. Becquerel, au moyen d'un appareil très-ingénieux, a découvert que l'électricité développée par la pression, dans le cas où la vitesse de séparation donnait le maximum de tension, était proportionnelle à la pression jusqu'à une certaine limite. Les corps élastiques dont M. Becquerel s'est servi sont des plaques de liége, de caoutchouc, d'amadou, d'écorce d'orange, de moelle de sureau, isolées par des manches de gomme laque.

971. La chaleur a une grande influence sur le développement de l'électricité par la pression. Le spath d'Islande, qui par la pression prend une tension positive, acquiert de l'électricité négative, lorsque sa température a été suffisamment élevée. Deux corps de même nature, tels que deux morceaux de liége, de spath d'Islande, pressés, s'électrisent rarement; mais lorsque l'un d'eux est échauffé, ils se trouvent tous deux, après la séparation, dans deux états électriques opposés; si la pression dure jusqu'à ce que l'équilibre de température ait lieu, les corps séparés ne sont plus électrisés.

972. Plusieurs phénomènes paraissent avoir beaucoup d'analogie avec ceux que nous venons de décrire. Lorsqu'on sépare dans l'obscurité deux lames de mica, il y a dégagement de lumière, et si, avant la séparation, on les fixe à des manches isolants, elles prennent des tensions électriques opposées. La chaux sulfatée présente le même phénomène; mais, pour l'observer, il faut la priver de son eau hygrométrique, et élever la température. Une carte dédoublée donne des résultats analogues. Cependant le développement de l'électricité par exfoliation ne paraît convenir, à quelques exceptions près, qu'aux substances régulièrement cristal-

lisées : car les fragments d'un bâton de verre ou de résine ne possèdent aucune électricité.

Le choc, produisant une compression subite, doit nécessairement développer de l'électricité; il serait possible que la lumière qui l'accompagne quelquefois provînt de la combinaison rapide des électricités qui auraient été séparées par la pression.

§ 4. *Examen des circonstances qui accompagnent le développement de l'électricité par le frottement ou la pression.*

973. Tous les corps, comme nous l'avons déjà dit, paraissent produire de l'électricité par le frottement; le plus grand dégagement a lieu, lorsqu'un des corps frottés est mauvais conducteur et l'autre très-bon conducteur; il est très-faible, au contraire, quand les deux corps sont à la fois bons conducteurs. Il est même difficile de reconnaître l'électricité dégagée par le frottement des métaux en masses, au moyen d'un électromètre; mais on peut constater ce dégagement, en mettant les deux métaux en communication avec un rhéomètre multiplicateur très-sensible (instrument formé d'un fil de cuivre recouvert de soie, enroulé autour d'un cadre dont le centre est occupé par une aiguille aimantée). Il se développe par le frottement des courants électriques dans le fil de l'instrument, dont le sens et l'intensité se reconnaissent à la direction et à l'amplitude des déviations de l'aiguille, et qui permettent de déterminer l'espèce d'électricité que prend chaque métal.

974. M. Becquerel, à qui on doit la découverte du fait dont il est question, fixe les extrémités des lames métalliques qui doivent être frottés aux extrémités du fil du rhéomètre, et recouvre de mastic les points de jonction, afin d'éviter les courants électriques qui pourraient résulter des changements de température de ces points : en posant les lames les unes sur les autres, il ne se produit rien; mais en les frottant légèrement, il se produit un courant. D'après ces expériences, M. Becquerel a formé le tableau suivant, dans lequel chaque métal est négatif par rapport à ceux qui suivent, et positif par rapport à ceux qui précèdent :

Bismuth.	Plomb.	Zinc.
Nickel.	Étain.	Fer.
Cobalt.	Or.	Cadmium.
Palladium.	Argent.	Antimoine.
Platine.	Cuivre.	

Cet ordre est le même que celui qui est relatif à l'électricité développée par la chaleur, comme nous le verrons plus tard. Il ne change pas par le poli ou les aspérités des surfaces frottantes; il en est encore de même quand un des corps est très-petit par rapport à l'autre, et que ce sont toujours les mêmes points qui frottent : d'où il suit que la chaleur développée est sans influence, car le corps le plus petit devrait s'échauffer plus que l'autre, et l'effet devrait changer suivant que l'un ou l'autre des corps frottés aurait de plus faibles dimensions, ce qui n'a pas lieu. Si l'on prend une lame et un bouton de même nature, en frottant le bouton contre la lame, le bismuth, l'antimoine, le fer et le platine donnent naissance à un courant dans lequel le bouton est positif, ce qui est contraire à l'effet qui serait produit pour des courants provenant de la chaleur dégagée, attendu que le bouton s'échauffe plus que la lame. Le cuivre et plusieurs autres métaux agissent en sens contraire.

975. Lorsqu'on frotte deux métaux dont l'un est réduit en limaille fine, la conductibilité dans ce dernier est assez affaiblie pour que l'on puisse reconnaître directement par l'électroscope l'électricité dont il s'est chargé. On constate ce fait en tenant à la main une lame métallique inclinée, sur laquelle on verse la limaille, qui tombe ensuite dans une capsule fixée au plateau d'un électroscope à feuilles d'or très-sensible. M. Becquerel a reconnu par ce moyen que de la limaille métallique, en passant sur une lame de même nature, prend l'électricité négative. L'effet est d'autant plus marqué que la limaille est plus fine et le choc plus rapide. La propriété des limailles d'être négatives par rapport aux plaques du même métal est d'autant plus marquée qu'elles sont plus facilement oxydables; l'antimoine fait exception, sa limaille est positive par rapport aux plaques de même substance. Quand la plaque et la limaille sont de natures différentes, celle-ci tend à prendre l'électricité négative. Si on élève la température de la limaille, ou de la limaille et de la plaque, la première devient plus négative, si elle l'était à la température ordinaire, et négative, ou moins positive, si elle était primitivement positive.

En donnant un mouvement rapide de rotation à une lame autour d'un axe vertical, établissant la communication de la lame avec l'électroscope, et laissant tomber des limailles plus ou moins fines sur la lame, M. Becquerel a reconnu que le peroxyde de manganèse, l'argent très-divisé et le sulfure de fer, projetés sur une lame de zinc, d'étain ou d'or, prennent l'électricité négative. La poudre

de peroxyde de manganèse produit plus d'effet que les autres substances. La limaille de zinc ne produit rien quand elle tombe sur une plaque de zinc dont le mouvement est rapide, tandis qu'elle reçoit un excès d'électricité négative lorsque la lame est en repos. On n'obtient point d'électricité quand les métaux sont en fragments de plusieurs millimètres d'épaisseur.

Dans le frottement des limailles contre les plaques métalliques il ne se produit point de courants, probablement à cause de la faible conductibilité des limailles.

976. Quand les corps sont mauvais conducteurs, l'état de leur surface et l'inégalité de leur température primitive, ou celle qui résulte de la chaleur dégagée par le frottement, ont une si grande influence, qu'avec les mêmes substances on obtient souvent des résultats opposés. Une légère différence dans l'état de la surface de deux corps de même nature frottés l'un contre l'autre, ou dans leur température, ou dans l'étendue des surfaces qui sont frottées, suffit pour développer dans chacun des électricités contraires. Toujours le corps dont la surface est la moins polie, ou dont la température était primitivement la plus élevée, ou qui est ébranlée par le frottement dans une plus petite étendue, tend à prendre l'électricité négative. Ainsi, deux plaques de verre dont l'une est polie et l'autre dépolie prennent, par le frottement, la première l'électricité positive, la dernière l'électricité négative : ainsi, deux rubans identiques étant frottés en croix, celui qui n'est frotté que sur une petite étendue prend l'électricité négative. On conçoit, d'après cela, qu'on ne puisse pas ranger les corps mauvais conducteurs dans un ordre tel que chacun soit toujours, par exemple, positif par rapport à ceux qui suivent, et négatif par rapport à ceux qui précèdent. On peut cependant établir, 1° que le poil de chat vivant prend l'électricité positive avec toutes les substances connues; 2° que le verre poli prend toujours l'électricité positive, excepté avec le poil de chat et le mercure; 3° que le verre dépoli est positif avec les corps résineux, et négatif avec le drap, le papier, la main, le poil de chat; 4° que la cire d'Espagne est négative avec les métaux; 5° que les corps résineux sont toujours négatifs avec les corps non résineux.

977. M. de la Rive a fait des expériences sur le frottement des métaux, en employant les doigts secs, l'ivoire, la corne, le liége et différentes espèces de bois : il a trouvé que le rhodium, le platine, le palladium, l'or, le tellure, le cobalt, le nickel et l'antimoine pre-

naient toujours l'électricité négative ; que l'argent, le cuivre, le laiton et l'étain, étaient presque toujours négatifs ; que le plomb et le bismuth étaient toujours positifs, et que le fer et le zinc étaient tantôt positifs et tantôt négatifs. M. Delarive suppose que les métaux sont toujours négatifs, et que les variations qu'on observe proviennent de l'oxyde enlevé par le frottoir, parce qu'alors le frottement a lieu entre l'oxyde et le métal. Il a aussi reconnu que la vitesse et la pression étaient sans influence.

978. En 1817, Wollaston avait annoncé qu'en plaçant une machine électrique sous une cloche dans laquelle on pouvait remplacer l'air par l'acide carbonique, il ne se dégageait pas d'électricité dans ce dernier gaz. En rapprochant ce fait de cette circonstance que les coussins des machines électriques, pour produire de grands effets, doivent être enduits de matières facilement oxydables, on avait été conduit à regarder comme très-probable que l'électricité provenait d'une action chimique. Une découverte plus récente de M. Becquerel venait à l'appui de cette conjecture : ce savant a reconnu qu'en broyant certaines substances solides, on pouvait en séparer les éléments, et produire des actions chimiques. Ainsi, quand on porphyrise dans un mortier d'agate un cristal de mésotype (silicate double de soude et d'alumine), la poudre est alcaline, et elle cesse de l'être quand elle a été lavée avec de l'eau distillée. Toutes les laves sont dans le même cas. En broyant ensemble un cristal de sulfate de potasse et du carbonate de chaux, ou du sulfate de potasse et du carbonate de baryte, ces sels sont en partie décomposés.

979. De tous les faits que nous venons de rapporter on ne pouvait rien déduire de général, non-seulement sur la cause probable du développement de l'électricité par la pression et le frottement, mais encore sur les principales circonstances nécessaires au développement de l'électricité : car il fallait pour cela connaître l'influence de la pression, de la vitesse et des autres circonstances, dans la production de l'électricité par le frottement ; il fallait chercher à rapprocher les circonstances qui accompagnent le développement de l'électricité par la pression et le frottement, pour déterminer en quoi diffèrent les effets produits par ces deux causes ; enfin, il fallait vérifier avec soin les expériences de Wollaston. J'ai essayé de résoudre ces questions, et je rapporterai sommairement les moyens que j'ai employés et les résultats auxquels je suis parvenu.

980. L'appareil que j'ai employé consiste (fig. 565) en un gros

cylindre de verre A, qui avait été arrondi et poli au tour ; il était traversé par un axe en fer, mobile dans des coussinets fixes CC, montés sur des supports isolants. Un frottoir D en bois, ayant inférieurement la courbure du cylindre, et que l'on pouvait recouvrir de différentes lames flexibles, était garni de deux appendices EE logés dans les coulisses FF ; à sa partie supérieure se trouvaient deux tiges métalliques GG, destinées à recevoir des poids HH. Sur une des faces du cylindre, et à une petite distance, était placé un peigne métallique K, fixé à un support isolé I ; le peigne communiquait, par un fil recouvert de soie, avec une tige de cuivre *ab*, logée dans un tube de verre, et terminée en *b* par une boule sur laquelle était vissé un petit cylindre d'acier bien poli, terminé lui-même par une boule *c*, et autour duquel se trouvaient deux petites hélices en fils de cuivre, l'une fixe et l'autre mobile, auxquelles étaient fixées deux pailles terminées par deux boules de moelle de sureau. Sur le tube de verre se trouvait une douille en cuivre, fixée à une plaque de même métal *ef*, portant un cadran divisé ; enfin un écran *mn*, placé à plusieurs mètres, était percé d'un petit orifice dont le centre correspondait à l'axe de la tige *ab* ; c'est par cet orifice qu'on observait la déviation du pendule mobile. Il était indispensable d'avoir un cylindre de verre parfaitement rond, afin que sa distance au peigne fût toujours la même pendant le mouvement, car, sans cela, le pendule aurait fait des oscillations continuelles. La nécessité de toutes les autres dispositions se comprend facilement.

Je m'assurai d'abord que les indications de l'instrument étaient toujours les mêmes dans les mêmes circonstances ; j'examinai ensuite successivement l'influence des différentes circonstances qui se présentent dans le frottement, et j'obtins les résultats suivants.

981. *Influence du temps, la vitesse et la pression étant constantes.* En employant pour frottoirs le papier nu ou couvert de cuivre, d'étain, d'argent, d'or, l'étain en feuilles, la soie, le coton, le taffetas ciré, etc., à partir de l'origine du mouvement, la tension va en croissant pendant un certain temps, en général très-court, après lequel elle reste constante.

982. *Influence de la vitesse.* Pour observer l'influence de la vitesse, on tournait la manivelle de manière à lui faire faire une révolution dans huit, quatre, deux ou un battement d'une montre, et chaque vitesse était continuée pendant un certain temps. Il résulte des expériences faites avec tous les corps frottants sur des

cylindres de verre, de résine et de taffetas ciré, que la tension électrique est indépendante de la vitesse, excepté pour certains corps, tels que la pluche de soie, le molleton, et en général les corps garnis de longs filaments, qui neutralisent au delà du contact une partie de l'électricité du cylindre d'autant plus grande que la vitesse est plus petite. Mais la permanence de tension, quelle que soit la vitesse, ne subsiste, quand le frottoir n'est pas très-bon conducteur, qu'à la condition que le cylindre n'est pas constamment déchargé : car, lorsqu'on décharge le cylindre par une frange métallique placée du côté opposé au peigne, la tension diminue avec la vitesse, et d'autant plus que le frottoir est plus mauvais conducteur. Ce phénomène s'explique facilement en considérant que, le cylindre étant constamment déchargé, l'électricité qui le recouvre provient uniquement de la dernière friction, et doit être égale à celle de signe contraire qui s'écoule dans le sol à travers le frottoir; quand le frottoir est formé d'un corps bon conducteur, il laisse écouler dans le sol à chaque instant toute l'électricité qui peut se développer; mais quand il est mauvais conducteur il n'en est plus ainsi, et il est facile de voir que la tension du cylindre, dans ce dernier cas, doit être plus petite que dans le premier, et diminuer avec la vitesse. Relativement à la quantité d'électricité développée, quand on fait varier la vitesse, il est évident que, la tension restant la même, quand on décharge continuellement le cylindre par une frange métallique, la quantité d'électricité produite est proportionnelle à la vitesse; mais je me suis assuré de l'exactitude de cette loi d'une autre manière. L'armature intérieure d'une bouteille de Leyde fut mise en communication avec le peigne, et une boule métallique communiquant avec le sol fut placée à une distance fixe de la boule de l'armature intérieure. Lorsqu'on fait tourner le cylindre avec une vitesse uniforme, la bouteille se décharge toujours après le même nombre de tours, quelle que soit la vitesse, pourvu que le frottoir soit bon conducteur; s'il est mauvais conducteur, les décharges ont lieu après des nombres de tours qui augmentent avec la vitesse. Cette dernière anomalie s'explique facilement d'après ce que nous avons dit relativement à l'influence de la vitesse sur la tension, quand les corps sont mauvais conducteurs et qu'on décharge le cylindre.

Cette permanence de tension ne provient pas de ce que, la déviation du pendule mobile étant très-grande, elle n'éprouve que de faibles variations relativement aux changements de tension du cy-

lindre : car, en augmentant le poids de la boule qui termine le pendule mobile, on peut rendre la déviation aussi petite qu'on veut, et toujours la déviation est indépendante de la vitesse. Elle ne provient pas d'un maximum de tension que prendrait le conducteur, et qu'il conserverait sensiblement malgré les variations de tension du cylindre, à cause de la perte par l'air : car, en éloignant les pointes du cylindre de verre, on diminue la tension autant qu'on veut, et toujours la permanence subsiste avec les variations de vitesse. Elle ne provient pas, non plus, d'un maximum de tension qui s'établirait sur le cylindre pour les petites vitesses, et subsisterait pour les plus grandes à cause de la conductibilité de l'air et des supports, d'abord parce que la tension est très-différente pour les différents corps, et ensuite par la raison que, si on supposait un accroissement de tension dû à la vitesse, la perte par les supports, qui est très-faible, à cause de la grande étendue de verre couvert de gomme laque qui se trouve de chaque côté de la zone qui passe sous le frottoir, devrait toujours laisser subsister un accroissement de tension.

983. *Influence de la pression.* Dans les expériences relatives à la pression, on a donné au cylindre mobile un mouvement de rotation uniforme longtemps prolongé, et on a fait varier progressivement la charge du frottoir de $1^k,2$ à $10^k,2$, en laissant entre les charges l'intervalle nécessaire pour que le pendule devint bien stationnaire. Je m'étais assuré d'avance qu'on obtenait les mêmes résultats en arrêtant le mouvement à chaque nouvelle charge; mais, la première méthode exigeant beaucoup moins de temps, je l'ai préférée. Les frottoirs employés avaient 40 et 144 centimètres carrés. J'ai opéré avec des cylindres mobiles en verre, en résine nue ou enveloppée de taffetas ciré ou de satin, et avec des frottoirs garnis de papier couvert de différents métaux, avec des feuilles d'étain, de plomb, avec diverses étoffes de soie, de coton et de lin, et avec différents cuirs. Il résulte de toutes ces expériences :

1°. Que, pour tous les corps que je viens de citer, la déviation, quoique très-différente pour chacun d'eux, reste sensiblement permanente pour chacun, quelle que soit la pression, que le cylindre soit ou non constamment déchargé par une frange métallique. Seulement, pour quelques-uns, la permanence ne commence à s'établir qu'à partir des charges $2^k,2$ ou $4^k,2$. Ainsi, pour la même vitesse, la quantité d'électricité développée est indépen-

dante de la pression. Par les mêmes raisons que nous avons exposées en parlant de l'influence de la vitesse, la permanence de tension ne provient ni de la grande déviation des pendules, ni d'un maximum de tension qui s'établirait dans le conducteur ou sur le cylindre.

2°. Que tous ces corps présentent quelquefois des variations de déviation correspondantes aux variations de pression. Ces variations sont en général très-petites; mais elles correspondent quelquefois, pour un accroissement de pression de 4 à 10 kilogr., à une variation d'électricité de 1/10. Ces anomalies, quand elles existent, sont toujours de signes contraires pour les corps bons conducteurs et les corps mauvais conducteurs : pour les premiers, frottant sur le verre, il y a décroissement.

D'après ces résultats, j'ai dû regarder comme probable que la pression, du moins à partir d'une certaine limite, était sans influence sur l'électricité développée, et que les petites anomalies qu'on rencontre quelquefois provenaient de quelques circonstances particulières produites par l'accroissement de pression. Mais, pour acquérir une certitude complète, il fallait faire varier la pression dans de plus grandes limites, et découvrir la cause des anomalies.

On ne pouvait pas, sans compromettre la solidité de l'appareil, augmenter de beaucoup les charges; mais on pouvait produire un accroissement de pression, en diminuant l'étendue de la surface inférieure du frottoir : c'est ce que j'ai fait, et j'ai reconnu qu'un accroissement de pression de 1 à 30 était encore sans influence.

Quant aux anomalies dont il a été question, je soupçonnais qu'elles pouvaient être le résultat de la chaleur dégagée. Pour vérifier cette conjecture, j'ai pris une tige de verre que j'ai frottée avec différents corps, d'abord sans développer de chaleur sensible, ensuite de manière à rendre le tube brûlant, et j'ai déterminé dans quel sens variait l'électricité développée sur le verre, en approchant la tige d'un électromètre à lames d'or, chargé d'électricité de signe contraire, jusqu'à ce que les lames fussent revenues au parallélisme. La distance à laquelle la tige de verre devait être amenée pour produire cet effet permettait d'apprécier facilement s'il y avait eu augmentation ou diminution. J'ai trouvé ainsi que, par l'accroissement simultané de la vitesse, de la pression et de la chaleur, le verre manifestait un accroissement d'électricité avec tous les corps mauvais conducteurs, et un décroissement avec les corps bons

conducteurs, qui, pour quelques-uns, allait jusqu'au changement de signe. Le changement de signe s'obtient très-facilement, quand on frotte sur le verre du plomb laminé.

Ainsi, ces variations sont dans le même sens que les anomalies qui nous occupent; or on ne peut pas admettre que les variations de l'état électrique de la tige de verre proviennent des accroissements de vitesse et de pression, car on ne pourrait pas expliquer comment les corps bons et mauvais conducteurs agissent en sens contraire; d'ailleurs, des expériences nombreuses démontrent que la vitesse et la pression sont sans influence : ainsi on ne peut attribuer ces variations et les anomalies en question qu'à la chaleur développée par le frottement. Il est d'ailleurs facile de se rendre compte de sa manière d'agir. En effet, la chaleur dégagée par le frottement ne doit pas se répartir également entre les deux corps; celui qui est le meilleur conducteur doit nécessairement prendre une température inférieure à celle de l'autre. Ainsi, le verre doit prendre une tendance négative avec les corps bons conducteurs et une tendance positive avec ceux qui sont plus mauvais conducteurs que lui.

Le frottement dégageant toujours de la chaleur, et en quantité croissante avec la vitesse et la pression, il semble que l'influence de la chaleur devrait toujours se manifester par les variations de vitesse et de pression. Mais il faut remarquer, 1° que dans l'appareil dont je me suis servi, et pour les limites de vitesse et de pression qui ont été employées, l'accroissement de température du verre, à quelques exceptions près, n'a jamais été que d'un petit nombre de degrés, ce dont je me suis assuré par des expériences directes; 2° que ce n'est pas la température commune des deux corps qui agit pour faire varier la tension électrique sur l'un d'eux, mais seulement la différence de leur température. Ainsi cette influence a dû être, en général, très-petite; mais il m'a été impossible de découvrir les circonstances physiques qui, dans certains cas, l'ont rendue sensible.

Certains corps mauvais conducteurs, principalement les étoffes pluchеuses de coton, de laine et de soie, présentent encore une anomalie facile à expliquer : lorsqu'on décharge constamment le cylindre, la déviation augmente avec la pression, et d'une quantité assez notable. Cet effet provient très-probablement de ce que la pression augmente le nombre des points de contact, et rapproche les fibres de ces substances, circonstances qui, en augmentant la

faculté conductrice, permettent un plus grand développement d'électricité.

Jusqu'ici je n'ai parlé que de la pression totale exercée sur la surface en contact avec le cylindre; mais jamais le contact réel n'existe que sur une partie de l'étendue du contact apparent, et ce sont les points qui se touchent qui supportent la pression, qui frottent, et qui produisent l'électricité. Or le nombre et l'étendue de ces points doit nécessairement augmenter avec la pression, et il est facile de voir que, si la somme de leurs surfaces augmentait proportionnellement à la charge, la pression éprouvée par une même étendue en contact réel resterait constante, quelle que fût la charge des frottoirs; et, par conséquent, la loi que nous avons déduite de l'expérience n'aurait rien de réel. Mais il n'en est pas ainsi : d'abord, on ne comprend pas la possibilité de l'existence, pour tous les corps, de la loi que je viens de supposer; en outre, dans toutes mes expériences, les frottoirs étaient disposés de manière que l'étendue du contact apparent n'augmentait pas sensiblement avec la charge : ainsi l'accroissement des points de contact ne pouvait provenir que de l'affaissement des aspérités. Or il est facile de reconnaître, à l'aide d'un prisme (1), que, pour tous les corps, et entre les limites de pression des expériences, le nombre et l'étendue des points de contact augmentent bien avec la pression, mais, en général, d'une quantité très-petite. Ainsi, l'augmentation du nombre des points de contact par l'accroissement de la charge rend seulement moins rapide l'accroissement de pression de chacun d'eux; mais cet accroissement ne subsiste pas moins.

Il faut encore remarquer que les points qui sont en contact réel supportent non-seulement la charge des frottoirs, mais encore la pression de l'air; et il faut examiner si les poids additionnels ne sont pas toujours très-petits par rapport à la pression de l'air : car, s'il en était ainsi, en admettant même que la pression eût une in-

(1) Lorsque, l'œil étant placé en P (fig. 565 A), on regarde à travers un prisme ABC, en rapprochant l'œil de la base AB du prisme, il existe une position au delà de laquelle les rayons de lumière entrés par AB ne peuvent pas sortir par AC : alors l'œil ne reçoit que les rayons qui pénètrent dans le prisme par la face BC, et qui, après s'être réfléchis sur AB, sortent par AC. L'angle OMN, où commence la réflexion totale sur AB, dépend du corps qui touche la surface AB; il est plus grand quand le corps est solide que quand c'est l'air; alors, quand on place un corps sur AB, les points de contact se voient comme des taches dans un miroir : par conséquent, si on exerce sur le corps des pressions croissantes, il sera facile de suivre l'accroissement du nombre et de l'étendue des points de contact.

fluence dans la production de l'électricité, les variations dues aux charges seraient insensibles. Lorsqu'on emploie de très-grands frottoirs, on peut croire qu'il en est ainsi; mais, pour des frottoirs à très-petite surface, en admettant que le contact réel soit établi sur toute l'étendue du contact apparent, ce qui est le cas le plus défavorable, il est facile de reconnaître que la pression de l'air est, au contraire, très-petite par rapport à celle qui résulte de la charge.

Ainsi cette loi, déduite de l'expérience, que la pression est sans influence sur le développement de l'électricité, subsiste encore, quand on considère la pression supportée par les points en contact réel, et qu'on tient compte de l'intervention de la pression de l'air.

984. *Influence de la largeur du frottoir.* Dans les expériences qui ont eu pour objet l'influence de la largeur des surfaces en contact, j'ai employé des frottoirs dont les surfaces inférieures avaient même longueur, et dont les largeurs étaient à peu près dans le rapport de 1 à 4; tous les corps, avec ces deux frottoirs, ont donné sensiblement la même déviation.

Pour vérifier les résultats de ces expériences, je me suis servi d'un même frottoir, en laissant dépasser la feuille de manière à l'appliquer sur le verre au delà du frottoir sur une étendue plus ou moins considérable, et en relevant l'extrémité de la lame contre le frottoir (fig. 565 B). Lorsque le système des pointes communiquant avec le conducteur était placé au-dessous du cylindre, le contact pouvait être prolongé à une grande distance, sans que la déviation fût changée; et pour cela il n'était pas nécessaire que le contact fût continu : on pouvait relever la lame par un pli, et mettre un intervalle de plusieurs centimètres entre le frottoir et la partie du prolongement de la lame en contact avec le verre, sans que la déviation fût changée (fig. 565 C). Cette expérience est importante, car elle démontre mieux que toutes celles que nous avons rapportées que la pression et l'étendue des surfaces en contact sont sans influence. En effet, j'ai démontré que la charge électrique du cylindre au delà de la lame provient entièrement du dernier contact; or cette surface en contact peut être très-petite, et la seule force directe qui la presse provient de l'élasticité de la feuille.

Mais quand la feuille qui passe sous le frottoir n'est pas repliée sur elle-même, qu'elle est entièrement libre, et que son extrémité touche le verre, la déviation décroît avec l'étendue du contact, excepté pour le taffetas ciré. Ces phénomènes s'expliquent facilement.

985. *Influence de la courbure.* Lorsque la lame qui passe sous le frottoir est formée d'une substance qui conduit bien l'électricité, la courbure de la lame au delà du contact a une influence sensible sur la tension électrique du cylindre. Quand les pointes du conducteur sont placées sous le cylindre, j'ai reconnu que, pour le papier cuivré et des rayons de courbures de 27, 14, 7 et 3,5 millimètres, les déviations étaient de 22, 20, 18 et 17.

Il n'est pas douteux que cette influence de la courbure de la lame au delà du contact provient de ce que cette partie courbe s'électrise par l'influence du cylindre, et que sa tension augmente la quantité d'électricité neutre qui se reforme sur la ligne de séparation des deux surfaces. On voit alors pourquoi l'influence dont il s'agit ne se reproduit point avec les corps mauvais conducteurs, et pourquoi, quand elle existe, elle augmente à mesure que le rayon de courbure diminue.

986. *Influence de l'épaisseur.* Les expériences relatives à l'influence de l'épaisseur ont été faites sur l'étain, le plomb, le satin, la peau, le taffetas ciré, le papier. Pour l'étain, l'épaisseur a varié de 1 à 40; pour les autres corps, de 1 à 9; pour le premier corps seulement la plus petite épaisseur était extrêmement faible. Il résulte de toutes mes expériences que l'épaisseur du corps est sans influence; mais, quand on décharge constamment le cylindre, et qu'on emploie des corps mauvais conducteurs, la déviation décroît à mesure que la vitesse augmente, et d'autant plus que l'épaisseur du corps est plus grande : la raison en est évidente, d'après ce que nous avons dit précédemment.

987. *Influence de la nature du frottement.* On distingue deux espèces de frottement, celui de glissement et celui de roulement. Jusqu'ici nous n'avons parlé que du premier; il était important d'examiner les effets produits par le dernier.

Dans les expériences faites à ce sujet, je me suis servi d'un cylindre de cuivre creux, garni à sa surface de plusieurs cuirs destinés à lui permettre de s'appliquer sur le cylindre de la machine sur une certaine étendue. Dans la direction de son axe se trouvaient deux tiges qui s'engageaient entre les guides des frottoirs, et qui étaient destinées à recevoir des poids qu'on fixait avec des écrous. En rendant le cylindre immobile, on produisait le frottement de glissement; en le laissant libre, on obtenait le frottement de roulement.

Ces expériences ont présenté une difficulté. Le cylindre roulant,

à cause des inégalités de sa surface, qu'il est presque impossible d'éviter, tend à se séparer du cylindre de verre, et d'autant plus que la vitesse est plus grande. J'essayai d'employer des ressorts; mais la rotation s'arrêtait par intermittences : alors je me suis servi des mains pour maintenir le cylindre appliqué sur le verre. C'est ainsi qu'ont été faites toutes les expériences dont je vais rapporter seulement les résultats.

Dans le frottement de roulement, les variations de vitesse produisent les mêmes effets que dans le frottement ordinaire : la déviation reste constante pour tous les corps à surface lisse, et augmente avec la vitesse pour les corps à surface plucheuse. De très-grandes variations de pression, au delà de celle qui est nécessaire pour établir le contact, ne produisent également aucune variation sensible dans la déviation. Ainsi, dans le frottement de roulement comme dans le frottement de glissement, la vitesse et la pression sont sans influence sur la tension de l'électricité développée.

Relativement à la comparaison des effets produits sur les mêmes corps par les deux espèces de frottement, voici les résultats que j'ai obtenus.

Les métaux en lames minces, le papier et les peaux lisses produisent exactement la même quantité d'électricité par les deux espèces de frottement.

Le satin, du côté non glacé, donne les mêmes résultats que les corps précédents; mais, du côté satiné, le roulement produit plus que la friction. J'ai fait voir dans mon mémoire que cet effet tenait à la faible conductibilité de la face lisse du satin.

Le molleton produit sur le verre par le roulement une plus grande déviation que par la friction. Cette différence provient très-probablement de l'action des filaments qui se trouvent au delà du contact, action qui est beaucoup plus grande dans le frottement de glissement que dans le frottement de roulement.

Relativement au taffetas ciré, il y a deux cas à considérer, celui où le taffetas est très-sec et n'adhère pas aux corps, et celui où il est glutineux. Dans le premier cas, il produit le même effet que la peau et les métaux en lame mince, la déviation est la même par les deux frottements; dans le second cas, avec le verre poli, l'électricité du cylindre change de signe avec le changement de frottement, ce qui devait être : car l'électricité produite par le frottement de roulement rentre évidemment dans le cas de l'électricité développée par la pression, seulement il y a continuité. Avec le verre dépoli

et la résine, il y a seulement diminution de déviation. Mais, comme l'adhésion ne se manifeste que par le roulement, il est très-probable que ce n'est pas le mode de frottement qui produit la diminution de tension et le changement de signe, mais seulement la différence de l'action moléculaire qui se produit dans les deux cas, et que l'adhésion agit toujours en donnant une tendance positive aux corps glutineux.

988. Il résulte de tout ce que nous venons de dire, que, dans le développement de l'électricité par le frottement de glissement ou de roulement, la pression et la vitesse sont sans influence sur la tension ; que la quantité d'électricité est proportionnelle à la vitesse, quelle que soit la pression ; et que toutes les anomalies qui peuvent se présenter s'expliquent facilement, ou par les aspérités des surfaces, ou par l'imparfaite conductibilité des frottoirs, ou par les variations de forme que la pression fait éprouver aux corps ; ou enfin par la chaleur développée, ou par l'adhérence.

989. Remarquons maintenant que le frottement de roulement n'est autre chose qu'une pression et une séparation continues des surfaces mises en contact : ainsi on aurait dû obtenir par ce moyen les mêmes résultats que M. Becquerel a obtenus par la pression. Comment se fait-il qu'ils soient si différents en apparence? L'explication est facile. M. Becquerel n'a opéré que sur des corps très-élastiques et très-compressibles, tels que du liége, de la moelle de sureau, et il n'a pas opéré sous de très-grandes pressions : alors les accroissements de pression ont toujours été accompagnés d'un accroissement dans le nombre et l'étendue des points de contact, et c'est à cette circonstance qu'est dû l'accroissement d'électricité qu'il a observé. Dans mes expériences, au contraire, j'ai opéré sur des corps peu compressibles, tels que du papier nu ou couvert de différents métaux, et je n'ai reconnu la permanence de tension qu'au delà d'une certaine limite de charge, celle à laquelle l'accroissement du nombre des points de contact restait sensiblement constant. Cette explication n'est point une hypothèse : je me suis assuré par des expériences directes qu'il en est réellement ainsi.

En pressant du liége, de la moelle de sureau et du papier contre un prisme de verre (*note*, p. 126), j'ai reconnu que, pour les premiers corps, le nombre des points de contact augmentait rapidement avec la pression jusqu'à une limite très-éloignée ; et que, pour le dernier corps, dans les limites de pression où la tension reste constante, l'accroissement du nombre des points de contact

était insensible. Ainsi je suis convaincu que l'accroissement d'électricité que M. Becquerel a obtenu par l'accroissement de pression provient uniquement de l'accroissement du nombre des points de contact, et que, si cet habile physicien avait opéré sous de plus grandes pressions, l'accroissement d'électricité qu'il a observé aurait fini par disparaître. Au surplus, comme il est impossible de ne pas admettre que, dans les corps sur lesquels M. Becquerel a opéré, le nombre des points de contact a augmenté avec la pression, il est évident que la pression réelle supportée par ces points diminuait avec leur nombre, et que, pour établir une loi quelconque entre la pression et l'électricité développée, il aurait fallu réduire les pressions à la même étendue de surface réellement en contact.

M. Becquerel (*Traité de l'Électricité*, t. v) objecte aux résultats que je viens de rapporter que je n'ai pas tenu compte *de l'électricité qui se recombine à la source même où elle se dégage*. Mais je n'ai jamais eu l'intention de découvrir ce qui se passait entre les corps frottants avant leur séparation, ce qui est impossible; je ne me suis occupé que de la tension électrique qui subsiste dans le corps mauvais conducteur après sa séparation du frottoir, la seule chose qu'on puisse observer. M. Becquerel explique la permanence de tension que j'ai constatée sous les plus grandes variations de vitesse et de pression, en disant que les fluides de signes contraires séparés par le contact, en quantités variables, avec toutes les circonstances du frottement, se combinent en partie sur la ligne de séparation, de manière à laisser sur le cylindre une couche électrique d'une tension constante. Mais cette explication suppose qu'il y a de l'électricité produite dans le contact avant la séparation, et en quantité variable avec les différentes circonstances de frottement, ce qu'aucune expérience n'a constaté.

990. *Influence de la nature du gaz environnant.* Avant de répéter l'expérience de Wollaston, j'ai dû commencer par m'assurer si, dans les mêmes circonstances, l'électricité se dissipait de la même manière dans l'air et dans l'acide carbonique : car, s'il n'en était pas ainsi, il est évident que les expériences sur la tension et la quantité d'électricité développée dans les mêmes circonstances, dans l'air et dans l'acide carbonique, ne pourraient conduire à rien de positif. Pour cela, j'ai fait construire deux balances de Coulomb aussi égales que possible. J'ai pris les fils de suspension dans un seul fil, que j'ai coupé en deux parties égales. Les corps de sus-

pension et les leviers mobiles avaient aussi les mêmes poids et les mêmes dimensions, ainsi que les boules intérieures et extérieures du conducteur. Pour vérifier leur identité, je chargeai les boules extérieures en les mettant en contact avec deux boules égales isolées avec de la gomme laque, dont une seule avait été électrisée, et qui avaient été mises en contact entre elles : les déviations ont été trouvées égales au même instant et à des époques quelconques. Alors j'ai fait passer un courant d'air sec dans un des vases ; et un courant d'acide carbonique également desséché dans l'autre, j'ai chargé les boules extérieures de la même quantité d'électricité, et j'ai reconnu que les déviations étaient à chaque instant sensiblement les mêmes, et que, par conséquent, la déperdition de l'électricité libre était sensiblement la même dans l'air et dans l'acide carbonique. Cette vérification faite, j'ai logé une petite machine électrique sous une cloche, le système des pointes communiquant avec un électromètre très-sensible, et j'ai rempli successivement la cloche d'air et d'acide carbonique desséchés par leur passage à travers un tube plein de chlorure de calcium. J'ai obtenu exactement la même déviation, que le verre fût ou non déchargé par une frange métallique avant de passer sous le frottoir. Mais comme, dans ces expériences, on pouvait supposer qu'il restait un peu d'air, je les ai répétées dans des circonstances qui ne laissaient pas subsister cette objection, en plaçant la petite machine dans un cylindre de verre où l'on pouvait faire le vide (fig. 990). Ainsi, le fait annoncé par Wollaston est inexact ; il est probable que, dans son expérience, ce célèbre physicien n'aura pas pris les précautions convenables pour dessécher complétement l'acide carbonique.

991. Nous pouvons maintenant, à l'aide de ce qui précède, résumer en peu de mots les circonstances qui produisent le dégagement de l'électricité par le frottement, et celles qui modifient ce dégagement.

1°. Tous les corps sont électriques par le frottement.

2°. Dans le dégagement de l'électricité par le frottement ou la pression, il n'y a que deux conditions importantes à remplir, contact et séparation : car la vitesse, la pression et le mode de frottement étant sans influence, la nature, la direction et la grandeur de l'ébranlement des molécules ne sont pour rien dans ces phénomènes.

D'après cela, on doit regarder comme très-probable que l'électricité se développe par le fait seul du contact, et que la séparation des deux corps ne fait que mettre les électricités en liberté.

Il y a quelques années, M. Armstrong reconnut qu'un jet de vapeur sortant d'une chaudière était fortement électrisé. Ce phénomène fut étudié par plusieurs physiciens; M. Faraday démontra qu'il était dû au frottement de la vapeur entraînant de l'eau à l'état liquide contre les parois de l'orifice de dégagement. La vapeur sèche et l'air sec, par leur frottement, ne produisent point d'électricité; mais ils en dégagent, lorsqu'ils tiennent en suspension des corps liquides. La vapeur entraînant de l'eau contenant des substances étrangères qui augmentent sa conductibilité, telles que des sels solubles, ne produit point d'électricité. (*A. C. et P.*, t. x.) Nous avons décrit [914] l'ingénieuse machine de M. Armstrong.

§ 5. *Électricité atmosphérique.*

992. Il existe une grande analogie entre les effets produits par la foudre et ceux qui proviennent des décharges des grandes batteries électriques; les décharges électriques, comme la foudre, sont accompagnées d'une vive lumière qui apparaît sous la même forme; l'électricité produit, comme la foudre, la fusion des métaux, l'inflammation des matières combustibles, et la mort des animaux. Les pointes des corps conducteurs voisins des nuages orageux deviennent lumineuses pendant la nuit, comme les pointes métalliques voisines du conducteur d'une machine électrique : c'est ce phénomène qu'on désignait autrefois sous les noms de *feux Saint-Elme*, ou de *Castor et Pollux*.

Mais ce ne fut qu'en 1752 que Franklin constata l'identité de la foudre et de l'électricité par des expériences que nous allons rapporter. Il lança contre un nuage orageux un cerf-volant armé d'une pointe et retenu par une ficelle. D'abord le fil ne donna aucun indice d'électricité, parce qu'il n'était pas assez bon conducteur; mais une légère pluie étant survenue, il devint bon conducteur, et Franklin parvint à en tirer des étincelles. Il plaça ensuite sur sa maison une barre de fer isolée, terminée supérieurement par une pointe, et à sa partie inférieure par un carillon électrique [915] : le bruit du carillon annonça plusieurs fois que la barre était chargée d'électricité. Pendant que cet homme célèbre se livrait, à Philadelphie, à ces recherches importantes, il avait communiqué ses idées aux physiciens d'Europe, en les engageant à faire des essais.

Dalibard, physicien français, fit construire à Marly-la-Ville, près de Paris, une cabane sur laquelle il plaça une barre de fer ter-

minée supérieurement par une pointe, et isolée inférieurement : après le passage d'un nuage orageux, la barre donnait des étincelles à l'approche d'un corps conducteur. Canton, pour obvier au défaut d'isolement de la barre occasionné par la pluie qui mouillait le support isolant, le couvrit d'un chapeau : alors le conducteur conserva l'électricité qu'il avait acquise, et il reconnut que les nuages étaient chargés tantôt d'électricité positive, tantôt d'électricité négative, et que la pluie et la neige électrisaient aussi la barre.

M. de Romas, en 1759, fit l'expérience du cerf-volant : il entrelaça une corde de chanvre d'un fil de fer, terminée par un cordon de soie qui l'isolait parfaitement ; et, pour se mettre à l'abri d'une décharge trop violente, il tirait les étincelles au moyen d'un excitateur à manches de verre de 60 centimètres de longueur, dont une des extrémités communiquait avec le sol. L'appareil ayant été dirigé vers un nuage orageux, M. de Romas parvint à tirer des étincelles qui avaient plus de 3 mètres de long, et qui faisaient un bruit analogue à des coups de pistolet. On voit d'après cela combien la grande conductibilité de la corde rendait importantes les précautions que nous venons de rapporter, et quel danger M. de Romas aurait couru s'il avait reçu de semblables commotions.

993. Il résulte de ce qui précède que les nuages orageux sont électrisés, et quelquefois très-fortement. Il est facile, d'après cela, de concevoir la cause des éclairs et de la foudre. Lorsque deux nuages sont tous deux chargés d'électricités contraires, ou que l'un d'eux seulement est électrisé, l'autre le devient par influence ; et s'ils se trouvent à une distance assez petite pour que les électricités puissent les abandonner, l'explosion qui en résulte est accompagnée d'une vive lumière, qui est l'éclair, et le bruit qui l'accompagne produit le tonnerre. La foudre n'est autre chose que la décharge d'un nuage orageux sur la surface de la terre.

L'éclair jaillit toujours en zigzag, comme les étincelles électriques que l'on obtient avec les machines : cette forme des étincelles et de l'éclair provient probablement de ce que le flux électrique comprime l'air en avant, et que, la compression ayant acquis une certaine limite, le flux se porte latéralement où il éprouve moins de résistance ; les grands crochets peuvent aussi résulter de ce que la décharge a lieu successivement sur des points plus conducteurs, qui peuvent être disposés d'une manière quelconque, par exemple sur de petits nuages. Le bruit du tonnerre ne peut pas provenir, comme on l'avait supposé, de la réflexion du son contre

les nuages, car en mer le bruit du canon n'est jamais répété, quels que soient le nombre et la disposition des nuages. Le bruit du tonnerre provient de la série des bruits qui se manifestent dans les principaux centres d'ébranlement; les coups sont successifs et analogues à un roulement de tambour, lorsque l'observateur est à des distances différentes des centres d'explosion, et les intervalles sont mesurés par le temps que le son met à parcourir les différences de ces distances; et on n'entend qu'un seul coup quand on est également éloigné des points où les chocs sont produits.

Les effets de la foudre sont ou des mouvements de transport, ou des effets de chaleur, ou des actions chimiques, analogues aux effets que nous produisons avec nos puissantes batteries électriques, mais qui sont bien autrement énergiques. Lorsque la foudre tombe sur un arbre, il arrive souvent qu'elle en vaporise spontanément la sève, et qu'elle divise le bois en filaments d'une grande longueur et d'une très-petite section; on dit alors que l'arbre a été *clivé*.

994. La foudre tombe en général de préférence sur les corps les plus élevés, tels que les clochers, les arbres; mais on conçoit que la faculté conductrice doit aussi exercer une grande influence sur le lieu de l'explosion. Dans les plaines, la foudre tombe de préférence sur les arbres, et surtout sur ceux qui sont très-élevés, parce que le bois en végétation est bon conducteur : ainsi les arbres sont des abris dangereux pendant l'orage.

Les clochers sont aussi des abris dangereux dans les temps d'orage, quand ils ne sont point garnis de paratonnerres, surtout à cause du préjugé si généralement répandu de sonner les cloches; car un grand nombre d'expériences concourent à prouver que la foudre tombe plus fréquemment sur les clochers où l'on sonne que sur ceux où l'on ne sonne pas. En 1718, Deslande fit savoir à l'Académie que, dans la nuit du 14 au 15 avril, la foudre était tombée en Bretagne sur vingt-quatre églises, que ces églises étaient précisément celles où l'on sonnait, et que la foudre avait épargné celles où l'on ne sonnait pas, et qui se trouvaient placées entre les premières.

995. Lorsqu'il se trouve au-dessous du sol, à une petite profondeur, de grandes masses d'eau ou de grandes masses métalliques, elles s'électrisent fortement par influence, et peuvent déterminer la chute de la foudre sur des lieux très-bas. Il est très-probable que c'est à ces dernières circonstances qu'est due la formation des tubes

vitrifiés, désignés sous le nom de *tubes fulminaires*, qui ont été trouvés dans les plaines de la Silésie, de la Prusse, du Cumberland et au Brésil. Ces tubes, qui n'ont que quelques millimètres de diamètre intérieur, ont souvent 50 millimètres de diamètre extérieur, et quelques-uns 6 à 10 mètres de longueur. Ces tubes sont enfoncés dans le sable dans des directions diversement inclinées; leur surface intérieure est complétement vitrifiée, et leur surface extérieure formée de grains de sable seulement agglutinés; il est très-probable que ces tubes ont été formés par le passage de la foudre à travers le sable où ils ont été trouvés. C'est d'ailleurs ce que MM. Savart et Hachette ont mis hors de doute : en faisant passer une forte décharge électrique à travers du verre en poudre, ils ont obtenu de petits tubes formés de poudre de verre agglomérée.

996. La foudre, en frappant un animal, détermine des lésions dans les organes, et principalement dans le système vasculaire; c'est à cause de ces lésions que la putréfaction se manifeste très-promptement. On attribue aux orages l'acescence du lait et une plus prompte corruption des chairs; mais la température élevée de l'air dans les orages pourrait bien être la cause unique de ces phénomènes. La foudre rend magnétiques les barres de fer sur lesquelles elle passe, et change souvent les pôles des aiguilles aimantées; ce sont des faits qu'on produit aussi par des décharges électriques.

997. Fusinieri a trouvé des traces de soufre aux extrémités des racines d'un peuplier par lesquelles la foudre était sortie; M. Boussingault a reconnu de l'oxyde de fer sur des arbres foudroyés, et une matière charbonneuse sur des roches cyanitiques; s'il était démontré que la foudre n'avait point traversé, avant, d'autres corps d'où ces dépôts auraient pu être entraînés, il faudrait admettre que ces substances existaient dans la foudre, et il serait bien difficile d'en comprendre l'origine.

998. La foudre, en traversant l'air, produit de l'acide nitrique par la combustion de l'azote : c'est probablement là l'origine des nitrières naturelles; aussi M. Boussingault a observé, aux environs de Rio Bamba, que le nitre se forme de préférence dans les lieux où les orages sont fréquents.

999. *Choc en retour.* La foudre produit encore un phénomène particulier connu sous le nom de *choc en retour*, et qui consiste en ce que des hommes et des animaux éprouvent de violentes commotions, et quelquefois meurent subitement, à l'instant où la foudre

éclate sur un autre point qui peut être très-éloigné. Ce phénomène s'explique d'une manière très-simple. En effet, soit ABC (fig. 566) un nuage chargé d'électricité que je suppose positive : les points de la surface du sol qui correspondent aux points A et C seront électrisés par influence; si l'explosion a lieu au point A, la partie du sol correspondante au point C rentrera brusquement à l'état naturel par le retour de l'électricité positive qui avait été refoulée dans le sol et y était retenue par l'action de l'électricité du nuage, et ce retour subit devra nécessairement produire de violentes commotions dans les êtres organisés qui se trouveront au point C. On peut mettre en évidence l'effet du choc en retour par l'expérience suivante. On place à une certaine distance d'une machine électrique un conducteur garni d'un électromètre : ce dernier s'électrise par influence, ce qu'on reconnaît à la déviation du pendule, et la recomposition des fluides qui a lieu toutes les fois qu'on décharge la machine produit dans le pendule un mouvement très-sensible ; en remplaçant l'électroscope par une grenouille écorchée, elle éprouve de vives agitations quand on tire une étincelle de la machine. Le choc en retour ne produit jamais les effets de transport et de chaleur qui accompagnent toujours la chute de la foudre sur les corps qu'elle frappe directement.

M. Arago a publié dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes de* 1838, une notice très-étendue sur le tonnerre, dans laquelle il a résumé toutes les observations qui ont été faites sur ce météore depuis la plus haute antiquité. Nous renvoyons le lecteur à cet important travail, qu'il serait impossible d'analyser dans un traité élémentaire, et au sixième volume du *Traité de l'Électricité* de M. Becquerel.

1000. *De la grêle.* Parmi les phénomènes qui accompagnent les orages, il en est un dont nous n'avons pas encore parlé, et qui produit souvent de terribles effets : c'est la grêle. La grêle se forme, dans nos climats, au printemps et en été, aux heures les plus chaudes de la journée; elle tombe rarement pendant la nuit. La grêle précède les pluies d'orage, les accompagne quelquefois, mais les suit rarement. Les nuages qui la versent sont en général peu élevés, d'un gris cendré qui leur est propre; leurs bords sont échancrés. Les grêlons sont formés d'un noyau de neige environné de plusieurs couches concentriques de glace.

On avait supposé que la grêle devait son origine à de l'eau de pluie dont les gouttes s'étaient congelées à une grande hauteur, et

qui, dans leur chute, rencontraient de nouvelles gouttes liquides dont les molécules congelées s'arrangeaient autour d'elles par des couches concentriques, et augmentaient leur volume; mais, comme la grêle ne se forme souvent qu'à une petite hauteur, on ne peut pas admettre que, dans le petit espace qu'elle parcourt, les grains puissent acquérir un poids qui va souvent jusqu'à plus de 50 grammes. M. Mattenci affirme en avoir vu du poids de 750 grammes. Volta a expliqué l'accroissement de volume des grêlons de la manière suivante. Il suppose deux nuages chargés d'électricités contraires, voisins l'un de l'autre, et dont le plus élevé contient de petits grains de grêle provenant de la congélation subite de la vapeur : la grêle tendra à tomber en vertu de son poids, et sera repoussée par le nuage inférieur aussitôt qu'elle en aura partagé l'électricité; le nuage supérieur l'attirera et la repoussera de la même manière, et, dans ce trajet réitéré d'un nuage à l'autre, les grains de grêle, rencontrant de la vapeur aqueuse, la condensent à leur surface, et augmentent de volume par couches concentriques, jusqu'à ce que l'action de la pesanteur les fasse tomber. Un fait qui vient à l'appui de cette explication consiste en ce que la chute de la grêle est ordinairement précédée par un bruit semblable à celui que produirait le choc de corps durs agités par des mouvements rapides. Mais on ne conçoit pas pourquoi l'attraction, qui est assez puissante pour faire mouvoir les grêlons, ne rapprocherait pas les nuages; cette explication n'est point généralement admise. Tout ce qu'on sait maintenant sur la grêle, c'est qu'il est très-probable que sa formation est due à des phénomènes électriques.

1001. *Des trombes.* Une trombe est un nuage en colonne à peu près verticale, assez ordinairement évasé par le haut, où il se confond avec d'autres nuages auxquels il paraît suspendu, et communément terminé par le bas en pointe plus ou moins rapprochée de la terre. Ce nuage, ordinairement animé d'un mouvement rapide de rotation et de translation, lance souvent tout autour de lui une pluie abondante quelquefois mêlée de grêle. Il déracine les arbres, renverse les édifices, et entraîne tout ce qui ne présente pas une très-grande résistance. Enfin, lorsqu'une trombe passe au-dessus de l'eau, le liquide est soulevé dans la trombe comme s'il était aspiré. C'est probablement à ce dernier phénomène que sont dues les pluies de crapauds, qui ont été trop souvent observées pour qu'il soit permis de nier leur existence. Lorsqu'une trombe plonge dans la

mer par sa partie inférieure, et qu'elle est traversée par un boulet de canon, ordinairement elle se divise : la partie inférieure disparaît, et la partie supérieure reste suspendue aux nuages. Les phénomènes qui se produisent dans les trombes, ainsi que les circonstances qui les produisent, sont complétement inconnus.

Le 18 juin 1839 une trombe a parcouru la commune de Chatenay et y a produit de grands dégâts. En 1845, une trombe éminemment électrique a produit dans les communes de Malaunay et de Monville de grands désastres : plusieurs filatures ont été renversées en ensevelissant sous leurs décombres les ouvriers qui les occupaient; un grand nombre d'arbres ont été clivés; sur un large plateau, les arbres ont été renversés par le météore dans le sens de son mouvement, et ceux qui se trouvaient à côté ont été renversés perpendiculairement les têtes en regard. M. Pouillet (*C. R.*, t. XXI) a considéré les désastres produits comme résultant uniquement d'un vent violent; mais les experts nommés par le tribunal de commerce de Rouen (MM. Becquerel, Lamé et Péclet) les ont attribués à la foudre que la trombe lançait de toutes parts sur son passage, et aux courants d'air que son énorme vitesse produisait derrière elle. Nous renvoyons, pour l'étude de ces phénomènes, au sixième volume du *Traité de l'Electricité* de M. Becquerel.

Dans nos climats, les orages ont principalement lieu en été; entre les tropiques, la saison des orages commence précisément à l'époque où le soleil approche du zénith (M. BOUSSINGAULT).

1002. *Electricité de l'air.* Non-seulement les nuages sont souvent chargés d'électricité, mais encore l'air atmosphérique, même dans les jours sereins, du moins dans nos climats. Dans les mers polaires il n'est jamais électrisé, et il n'y a jamais d'orages (SCORESBY). L'appareil dont on se sert pour reconnaître l'électricité de l'air est composé d'un électroscope ordinaire, surmonté d'une tige métallique terminée par une pointe ou par une petite lampe : l'air raréfié devenant meilleur conducteur, l'instrument se charge plus facilement (VOLTA); mais comme la combustion même dégage de l'électricité, il ne faut pas confondre l'électricité qui résulte de cette cause avec celle qui provient de l'atmosphère. On peut établir la communication entre la tige et l'électromètre par un tube de verre rempli d'eau distillée, qui possède une conductibilité suffisante pour transmettre l'électricité de l'air, mais insuffisante pour transmettre celle de la combustion. Pour obtenir l'électricité de l'air à une grande hauteur, on peut se servir d'une flèche fixée à

un fil métallique dont l'extrémité se termine par un anneau très-large passé dans la tige de l'électromètre : le fil ne se détache de l'instrument que quand il a été complétement developpé par le mouvement de la flèche. Dans les observatoires on se sert d'une tige de bois verticale de 6 à 7 mètres de hauteur, environnée de plusieurs fils métalliques, isolée dans toute son étendue et supportée par un cylindre de verre enduit de gomme laque; une tige communiquant avec un puits se termine supérieurement par un timbre placé à quelques centimètres des fils métalliques, et dans l'intervalle se trouve une boule métallique suspendue à un fil de soie : le bruit avertit que la tension de la tige a acquis une certaine énergie, et le mouvement de la boule la décharge. Un électromètre est en communication permanente avec la tige, et on peut à volonté établir aussi une communication permanente entre la tige et la tringle qui descend dans le sol. Mais les indications de l'électromètre sont loin de présenter une complète certitude, car nous verrons bientôt que l'air et la terre possèdent des électricités de signes contraires; et, comme l'électricité de l'air agit directement pour écarter les pailles, et que celle de la terre agit par influence, toutes deux concourent à augmenter la divergence. Il faudrait, à côté de l'instrument atmosphérique, en avoir un autre qui ne serait soumis qu'à l'influence de la terre, et il suffirait pour cela qu'il n'eût point de tige, et qu'il ne fut pas élevé au-dessus du sol à plus d'un mètre.

Il résulte des nombreuses expériences faites par MM. de Saussure, Biot et Gay-Lussac, Beccaria, Schubler, Arago, 1° que, quand le ciel est serein, l'électricité de l'air est toujours positive, dans les plaines comme sur les montagnes, par tous les vents et dans toutes les saisons, même quand la terre est couverte de neige; 2° que l'électricité est plus grande dans les lieux élevés que dans les vallées, nulle dans les maisons, dans les rues; mais qu'elle est sensible, dans les villes, sur les ponts et sur les places, et que dans un même lieu elle augmente à mesure qu'on s'élève au-dessus de la surface de la terre; en rase campagne, elle ne commence à être sensible qu'à 1 mètre ou $1^m,30$ au-dessus du sol; 3° que l'électricité de l'air serein est plus forte en hiver qu'en été; 4° que chaque jour, par un ciel serein, l'électricité de l'air a deux maxima et deux minima : le premier maximum a lieu de 7 à 9 heures du matin, le second de 7 à 9 heures du soir; le premier minimum vers 4 heures du matin, et le second de 5 à 10 heures du soir; enfin que la tension

électrique aux deux maxima et aux deux minima va en croissant de juillet à janvier, et en décroissant de janvier à juillet. Ces variations proviennent probablement de la production de l'électricité et de la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère, et doivent être troublées par les décharges accidentelles de l'atmosphère, par les pluies et les orages : dans les temps d'orage, l'électricité de l'air change à chaque instant de signe et d'intensité.

1003. *Causes de l'électricité atmosphérique.* Les circonstances dans lesquelles l'électricité se développe sont très-nombreuses; jusqu'ici il n'a été question que du frottement : nous étudierons les autres causes quand nous aurons fait connaître les propriétés de l'électricité en mouvement; mais nous devons indiquer ici les principales causes de la production de l'électricité atmosphérique. D'après M. Pouillet, ces causes sont l'évaporation et la végétation. Nous verrons bientôt, en effet, que, quand on évapore une dissolution renfermant un sel, la vapeur d'eau s'électrise positivement, et la liqueur négativement; on conçoit, d'après cela, que cette cause de développement d'électricité doit être très-puissante, la surface des eaux occupant une très-grande partie de la surface de la terre. Suivant le même physicien, la végétation donne jour et nuit de l'électricité positive à l'air. Mais dans ces expériences, M. Pouillet n'a point tenu compte de l'électricité produite par l'évaporation, et il est difficile d'admettre que les plantes émettent la même électricité le jour et la nuit, quand leurs effets chimiques sont si différents; car, sous l'influence de la lumière, les plantes décomposent l'acide carbonique de l'air et en absorbent le carbone, tandis que pendant la nuit les phénomènes sont opposés. (M. Becquerel, *Traité del 'électricité,* t. iv.) Il est très-probable que les plantes émettent le jour de l'électricité négative, et la nuit de l'électricité positive. (Chap. v, § 11.)

Nous rapporterons quelques expériences de M. Mattenci qui viennent à l'appui des faits que nous venons de citer. Ce physicien, après avoir isolé une lame métallique de trois pieds carrés de surface, la mit en communication par un fil métallique avec un électroscope à feuilles d'or garni de son condensateur, puis il exposa cette lame au soleil à une température de 26° à 30° Réaumur, et la couvrit de terre ordinaire mouillée avec une forte dissolution de sel marin : l'évaporation avait à peine commencé que les lames d'or divergeaient sensiblement par l'électricité positive. Cette expérience, répétée plusieurs fois avec différentes espèces de terre et différentes

dissolutions, a constamment donné les mêmes résultats; mais la divergence des lames d'or était d'autant plus grande que l'air était plus agité, parce qu'alors l'évaporation était plus rapide. Dans un bois, un électromètre surmonté d'une tige de bois terminée par une flamme ne donne point de signes électriques; en sortant du bois, on obtient presque toujours une indication d'électricité positive. L'électricité manque souvent dans l'air pendant les nuits calmes et sereines; mais, au point du jour, on trouve toujours dans les bois de l'électricité négative, qui bientôt disparaît. L'absence de l'électricité dans les bois pendant le jour peut s'expliquer par les électricités de signes contraires développées par l'évaporation et la végétation, et l'électricité négative pendant la nuit résulte probablement de l'électricité négative du sol que les plantes versent dans l'air.

1004. Il résulte nécessairement de ce qui précède que les mers, les lacs et les rivières, et, en général, toutes les eaux qui recouvrent la surface du sol et toutes les terres arides, doivent constamment se charger d'électricité négative, et que les terrains couverts de plantes doivent se charger d'électricité positive, mais seulement pendant la saison de la végétation et pendant le jour; mais, comme les terres végétales donnent toujours naissance à de la vapeur d'eau, et qu'il en est de même des plantes, l'effet de la végétation doit être en grande partie dissimulé par celui de l'évaporation : alors la surface de la terre devra principalement se charger d'électricité négative, et cette électricité développée à la surface du sol devra ensuite se disséminer suivant la conductibilité des terrains qui le composent. Volta a d'ailleurs démontré d'une manière directe le fait de l'état électrique négatif de la terre; les pluies artificielles des cascades, telles que celles de Reichenbach et de Stendbach, possèdent l'électricité négative, ce qui ne peut s'expliquer qu'en admettant que l'eau, jaillissant contre les rochers, en a partagé l'état électrique. D'après cela, l'électricité de l'air devrait être toujours plus grande vers le milieu de la journée qu'au lever et au coucher du soleil, en été qu'en hiver, et dans les pays chauds que dans les pays froids. Mais les variations de l'état hygrométrique de l'air, produisant des variations correspondantes dans sa conductibilité, doivent occasionner de grandes anomalies; elles expliquent très-bien les observations de Saussure, qui ne s'accordent pas avec les lois que suivrait l'électricité de l'air sec. Ainsi, en général, l'électricité de l'air devra être positive; elle pourra être nulle

à une petite hauteur, surtout dans les lieux bien boisés, et même négative par la communication directe de l'électricité du sol; l'électricité de l'air devra nécessairement s'accumuler dans les nuages, qui conduisent l'électricité beaucoup mieux que l'air; la pluie, les brouillards, devront servir souvent de conducteurs pour décharger l'électricité de l'air, et quand ces conducteurs seront insuffisants, l'électricité des nuages se déchargera brusquement sur la terre, dont la tension électrique aura été augmentée par influence.

L'électricité positive des nuages et négative de la terre fait voir pourquoi les nuages se rassemblent autour du sommet des hautes montagnes, et semblent y adhérer avec une force suffisante pour résister souvent à des vents assez forts.

1005. Ce qui précède explique l'état électrique de l'air dans les temps sereins; mais il reste à trouver la cause de la formation des nuages orageux, et des variations de nature de l'électricité de ces nuages. La vapeur d'eau conduisant l'électricité beaucoup mieux que l'air sec, on conçoit que les vapeurs, en se réunissant pour former les nuages, doivent entraîner avec elles une grande partie de l'électricité qui se trouvait dans l'espace où elles étaient disséminées; il est probable aussi que les nuages ne deviennent orageux que quand ils sont devenus assez denses pour que l'électricité, qui environne chaque globule, se réunisse en totalité à la surface du nuage. Il est également permis de croire que les nuages électrisés négativement proviennent de ce qu'ils ont été électrisés par l'influence d'autres nuages positifs, lorsqu'ils communiquaient avec la terre par des rochers, des arbres ou des vapeurs, et que la communication a cessé par une cause quelconque. Des nuages peuvent aussi être négatifs seulement dans certaines parties. Il serait possible aussi que les vents de différentes directions, qui existent toujours pendant les orages, donnassent aux masses d'air, qui se trouvent à des températures différentes, des électricités de signes contraires.

1006. *Paratonnerres.* Les paratonnerres sont de grandes verges métalliques placées au sommet des édifices, et qui communiquent avec la terre humide ou avec l'eau par des conducteurs de même nature, et sans solution de continuité. Lorsqu'un nuage chargé d'électricité passe dans le voisinage, le paratonnerre est électrisé par influence; l'électricité de nature contraire à celle du nuage s'accumule vers la pointe, tandis que l'autre est refoulée dans le sol;

la première s'écoule continuellement vers le nuage, et neutralise souvent sans explosion son électricité libre. On peut facilement vérifier le fait que nous venons d'énoncer, en plaçant au dessous ou à côté d'un conducteur isolé et électrisé une pointe communiquant avec le sol.

L'invention des paratonnerres est due au célèbre Franklin; leur utilité a été constatée par une expérience de plus de soixante-dix ans.

1007. Aux États-Unis d'Amérique, où les orages sont plus fréquents et plus redoutables qu'en Europe, l'usage des paratonnerres est devenu populaire. Un grand nombre de bâtiments ont été foudroyés, et on en compte à peine deux qui n'aient pas été mis entièrement à l'abri de la foudre par leurs paratonnerres. Il n'y a pas à craindre, non plus, que les édifices armés de ces appareils soient, par cela même, plus exposés à être foudroyés : car l'influence des paratonnerres ne s'exerce qu'à une petite distance; d'ailleurs, la propriété qu'auraient les paratonnerres d'attirer les nuages orageux supposerait aussi celle de transmettre librement l'électricité au sol, et, par conséquent, il n'en pourrait résulter aucun inconvénient.

1008. Nous avons dit que les paratonnerres devaient être terminés par des pointes aiguës : cette condition est importante pour que l'influence s'étende à la plus grande distance possible, et que le nuage soit neutralisé avant de se trouver à la distance d'explosion; si la tige était arrondie, elle n'en préserverait pas moins l'édifice; seulement il y aurait explosion sur le sommet de la tige, mais le fluide n'en suivrait pas moins le conducteur de préférence aux substances beaucoup moins conductrices qui constituent l'édifice. D'après le docteur Rittenhousse, les pointes d'un grand nombre de paratonnerres de Philadelphie ont été émoussées par la fusion, et l'on n'a point observé que les bâtiments auxquels ils appartiennent aient été frappés de la foudre depuis la destruction de ces pointes.

1009. Il nous reste maintenant à examiner les détails de construction nécessaires pour que les paratonnerres remplissent exactement l'objet auquel ils sont destinés.

1°. La pointe qui termine la tige doit être très-aiguë, afin qu'elle agisse sous la plus petite influence possible, et par conséquent à la plus grande distance possible du nuage; et, de plus, il est indispensable qu'elle ne puisse s'oxyder par le contact de l'air, ni se

fondre facilement par des décharges électriques : car, si la pointe s'arrondissait ou par l'oxydation ou par la fusion, elle attirerait le nuage, et provoquerait les explosions que l'on veut éviter, mais qui cependant seraient sans danger; la pointe doit donc être formée d'un métal difficile à fondre et non oxydable à l'air; on emploie ordinairement le platine. La tige de fer est terminée par une tige de cuivre d'environ $0^m,50$, à l'extrémité de laquelle est soudée à l'argent une aiguille de platine de $0^m,05$ de longueur.

2°. La tige doit être assez élevée pour protéger tout l'édifice. D'après les observations de Charles, qui s'était beaucoup occupé de cet objet, il paraît qu'une tige aiguë protége contre la foudre un espace circulaire dont le rayon est double de sa hauteur : il faudra donc donner à la tige une hauteur égale au quart du diamètre de l'édifice qu'elle doit protéger. Si l'édifice avait de trop grandes dimensions, on y placerait plusieurs paratonnerres; leur distance devrait être quatre fois plus grande que leur hauteur; les longueurs des tiges de paratonnerres le plus souvent employées sont de 7 à 9 mètres.

3°. La partie inférieure de la tige devrait être isolée de l'édifice, et en communication seulement avec le conducteur; mais cet isolement serait très-difficile à exécuter et à maintenir. Heureusement il n'est point indispensable, car l'électricité suit toujours de préférence les bons conducteurs : ainsi on pourra fixer la partie inférieure de la tige à une des pièces de charpente de la toiture.

4°. Le conducteur qui fait communiquer la tige avec le sol doit y arriver par le plus court chemin, n'avoir aucune solution de continuité, et se prolonger jusque dans un puits ou dans un lieu humide, afin que la communication soit plus immédiate. Si le terrain était sec, il faudrait faire descendre le conducteur de 4 ou 5 mètres dans la terre, et l'environner de charbon calciné, de braise (1); le coke, étant meilleur conducteur, est encore préférable. Du fer ainsi enveloppé, après trente ans, n'avait éprouvé aucune altération. Il serait utile de diriger de ce côté les eaux pluviales. Dans tous les cas, il faut que l'extrémité qui plonge dans la terre ou dans l'eau se divise

(1) Le charbon non calciné ne conduit ni l'électricité ni la chaleur, et brûle facilement dans l'air. Le charbon calciné conduit facilement l'électricité et la chaleur, mais il brûle difficilement et s'éteint dans l'air. Ce dernier a une plus grande densité que le premier et absorbe moins d'eau à l'état de vapeur ou par immersion que le premier.

en plusieurs branches, afin que la communication avec le sol soit la plus étendue possible : car c'est là que réside la principale cause d'efficacité de l'appareil (1).

5°. Le conducteur n'a pas besoin d'être isolé, par la raison que nous avons donnée plus haut ; on lui fait suivre les murs de l'édifice en le soutenant par des tringles scellées dans les murailles et sur les toits.

6°. La tige et les conducteurs doivent avoir des dimensions suffisantes pour que de fortes décharges ne puissent pas les fondre; on a reconnu par expérience qu'il suffisait de donner à la partie inférieure de la tige un diamètre de $0^m,05$, et aux conducteurs $0^m,025$.

7°. La difficulté de former les conducteurs avec des barres de fer a fait imaginer de les remplacer par des cordes en fil de fer : celles de 15 à 16 millimètres de diamètre paraissent suffisantes dans tous les cas. Pour éviter l'oxydation du métal, on couvre ordinairement les conducteurs d'une couche de goudron.

8°. Quand l'édifice renferme des pièces métalliques un peu considérables, telles que des gouttières ou des lames de plomb, il faut les faire communiquer avec le conducteur.

9°. Lorsqu'on place plusieurs paratonnerres sur un édifice, on établit un conducteur pour chaque paire de tiges.

10°. Quelquefois on place sur les bâtiments isolés des tiges horizontales plus ou moins inclinées, communiquant avec le conducteur ; elles servent à préserver l'édifice des lambeaux de nuages orageux que les vents pourraient jeter sur ses faces.

La figure 567 représente la tige d'un paratonnerre, et la figure 568 la disposition de la tige et des conducteurs sur un édifice. Une grande partie de ce qui précède a été extrait du rapport fait à l'Académie par M. Gay-Lussac, au nom d'une commission chargée de rédiger une instruction sur les paratonnerres. (*Voyez*, pour plus de détails, les *Annales de Physique et de Chimie*, t. XXVI.)

1010. On a prétendu que les paratonnerres pouvaient avoir de l'influence sur la chute de la grêle ; mais il est évident que ces appareils n'auront quelque efficacité qu'autant que les pointes qui les terminent pourront agir sur les nuages orageux. Dans les vallées fermées par des montagnes élevées et voisines, et qui seraient héris-

---

(1) En 1753, le professeur Richmann, de Pétersbourg, fut foudroyé pour s'être approché de trop près d'une tige métallique isolée qu'il avait placée sur sa maison.

sées de paratonnerres, il est très-probable que l'on parviendrait à empêcher la formation de la grêle, parce que ces instruments exerceraient leur influence à des hauteurs suffisantes; mais dans les grandes plaines il paraît difficile d'élever des paratonnerres de manière à pouvoir conjurer l'orage. Il y a entre la foudre et la grêle cette grande différence : la foudre n'éclate que quand l'objet sur lequel elle doit se porter se trouve dans certaines conditions; la grêle, au contraire, se forme indépendamment des corps sur lesquels elle doit tomber. On conçoit d'après cela que les paratonnerres préservent constamment, et dans toutes les circonstances, des effets de la foudre, et qu'ils ne pourraient empêcher la formation de la grêle qu'autant que les nuages orageux seraient dans leur sphère d'activité; ce qui ne peut toujours avoir lieu.

CHAPITRE IV.

ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR LA CHALEUR DANS LES CRISTAUX.

1011. La chaleur, comme nous l'avons vu, a une grande influence sur l'électricité développée par la pression et le frottement; mais elle agit seule sur certains corps cristallisés pour séparer les deux électricités; elles se réunissent aux deux extrémités, qui acquièrent des tensions égales, mais de signes contraires.

1012. On peut facilement vérifier ce fait sur la tourmaline : en la chauffant et présentant successivement ses deux extrémités à un petit pendule, il est attiré par tous deux; mais si on communique de l'électricité au pendule, il est attiré par une des extrémités de la tourmaline, et repoussé par l'autre. La polarité de la tourmaline peut aussi être constatée au moyen de l'appareil fig. 569, qui est composé d'une plaque horizontale lestée par les boules *a* et *b*, et garnie à son centre d'une chape qui repose sur une pointe aiguë. On place sur la plaque une tourmaline échauffée, et on présente successivement à ses deux extrémités une autre tourmaline égale-

ment échauffée : un des pôles de la tourmaline est attiré, l'autre est repoussé; le sommet à trois faces possède l'électricité négative, et le sommet à six faces l'électricité positive.

1013. Mais, pour découvrir les plus faibles traces de polarité dans les tourmalines, il vaut mieux employer la disposition représentée fig. 570 : l'aiguille est suspendue dans une chape de papier à l'aide d'un fil de soie sans torsion; elle est environnée d'un cylindre de verre, ouvert par les deux bouts, reposant sur une plaque métallique que l'on échauffe avec une lampe à esprit-de-vin; l'échauffement étant très-lent, la température de la tourmaline sera sensiblement représentée par celle d'un thermomètre qui serait placé dans le cylindre à la même hauteur. Pour reconnaître l'espèce d'électricité qui s'est développée dans le cristal, on introduit par la partie supérieure du cylindre un corps faiblement électrisé, soutenu à l'aide d'un manche isolant et que l'on présente aux deux extrémités de la tourmaline.

1014. Æpinus a imaginé une disposition très-simple pour manifester l'électricité polaire de la tourmaline. AB (fig. 571) est un segment de tourmaline perpendiculaire à l'axe du prisme, tel que sont ordinairement les tourmalines taillées pour être montées en bagues; MN et PQ sont deux petites capsules métalliques qui embrassent la lentille de tourmaline; elles communiquent avec deux petites tiges *ab* et *cd* entre lesquelles se trouve un petit pendule de moelle de sureau, suspendu à l'extrémité d'un fil de soie très-fin. Quand la tourmaline a été électrisée par immersion dans l'eau chaude, le pendule oscille pendant des heures entières entre les tiges *ab* et *cd*.

1015. Voici les résultats des nombreuses expériences qui ont été faites sur la tourmaline par Canton, Wilson, Priestley, Bergmann, Æpinus, Haüy, et récemment par M. Becquerel :

1°. Toutes les tourmalines, même celles qui proviennent du même gisement, ne sont pas également susceptibles de devenir électriques par la chaleur; il en existe qui ne le deviennent point : il paraît que ce sont surtout les plus longues qui sont dans ce dernier cas; enfin il existe des tourmalines qui ne deviennent électriques que par un échauffement rapide.

2°. Pour chaque tourmaline il y a deux limites de température au delà desquelles le développement des pôles ne se manifeste pas : ces limites sont ordinairement 10° et 150° ; mais elles varient avec les dimensions des tourmalines.

3°. L'électricité polaire ne se manifeste que quand la tourmaline s'échauffe ou se refroidit dans toute son étendue. Quand sa température reste stationnaire, toute polarité disparaît; quand on échauffe ou qu'on refroidit une des extrémités seulement, la tourmaline ne possède qu'une seule espèce d'électricité.

4°. Les pôles électriques, qui se manifestent par l'échauffement, changent de nature par le refroidissement.

5°. Lorsqu'une tourmaline est électrique par la chaleur, et qu'on la brise en deux ou en un plus grand nombre de fragments, chacun d'eux possède la propriété d'acquérir deux pôles par la chaleur.

6°. Les tourmalines les plus électriques par la chaleur sont transparentes, et le sommet qui renferme le plus de facettes prend l'électricité positive par le refroidissement.

1016. Le développement de l'électricité par la chaleur a d'abord été reconnu dans la tourmaline; il paraît que depuis un temps immémorial on avait remarqué, dans l'Inde et dans l'île de Ceylan, que cette pierre jetée dans le feu avait la propriété d'attirer les cendres. Les Hollandais, auxquels les naturels du pays montrèrent ce phénomène, furent les premiers qui le firent connaître en Europe. Longtemps les tourmalines ont été très-rares en Europe; maintenant elles y sont très-communes, depuis la découverte en Espagne d'un gisement qui en renferme une grande quantité.

1017. Les cristaux électriques par la chaleur sont très-nombreux : le tableau suivant en renferme la liste d'après M. Brewster.

Diamant.	Oxalate d'ammoniaque.
Soufre.	Oxymuriate de potasse.
Zinc oxydé.	Sulfate de soude et de magnésie.
Quartz.	Sulfate d'ammoniaque.
Carbonate de chaux.	Sulfate de fer.
Carbonate de plomb.	Mésotype.
Sulfate de baryte.	Mésolithe.
Sulfate de strontiane.	Analcime.
Magnésie boratée.	Prénite.
Chaux fluatée.	Axinite.
Sulfure d'arsenic.	Grenat.
Scolézite.	Diopside.
Emeraude.	Sulfate de magnésie.
Topaze.	Prussiate de potasse.
Tourmaline.	Acétate de plomb.
Titane silicéocalcaire (sphène).	Carbonate de potasse.
Acide tartrique.	Oxymuriate de mercure.
Acide citrique.	Sucre.
Tartrate de soude et de potasse.	

La polarité électrique n'a été constatée que dans les cristaux qui dérogent à la loi de symétrie; dans les autres, le docteur Brewster a seulement reconnu une attraction sur les corps très-légers. Pour ces derniers, les faits observés par le docteur Brewster ne sont pas suffisants pour constater qu'ils étaient réellement électrisés. (M. Becquerel.)

Les phénomènes que présente la tourmaline, et qui seraient probablement offerts par toutes les autres substances électriques par la chaleur, ne peuvent point être expliqués dans l'état actuel de la science.

CHAPITRE V.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

§ 1er. *Phénomènes généraux.*

1018. En 1789, Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, en faisant des recherches sur l'irritabilité nerveuse des cadavres de grenouilles par l'électricité, reconnut que, quand on mettait les muscles et les nerfs en communication par un arc composé de deux métaux, ces organes éprouvaient de violentes convulsions. Galvani attribua cet effet à des électricités de nature contraire renfermées dans les muscles et les nerfs; cette opinion fut alors généralement admise. Mais bientôt Volta, à qui la physique devait déjà l'électrophore, le condensateur et l'eudiomètre, attribua les effets observés par Galvani au contact des métaux qui formaient l'arc de communication. Ce fait, que Volta démontra par des expériences multipliées, le conduisit bientôt à la découverte de la pile qui porte son nom. Cet appareil a amené dans la science une ère nouvelle par les nombreux phénomènes qu'elle a fait découvrir.

1019. Voici les expériences à l'aide desquelles Volta a constaté le développement de l'électricité par le contact des métaux. Si l'on

prend deux disques métalliques A et B (fig. 572) de nature différente, bien polis, non vernis, et garnis de manches isolants, et qu'après les avoir appliqués l'un contre l'autre en les tenant par ces manches, on les sépare, ils se trouvent chargés d'électricités contraires; mais comme leur tension électrique est extrêmement faible, il faut accumuler les petites quantités d'électricité développées par chaque contact dans l'électromètre condensateur (fig. 554).

On parvient alors, après un certain nombre de contacts, à charger l'instrument non-seulement de manière à reconnaître l'espèce d'électricité acquise par le disque, mais encore à produire des étincelles. Pour que cette expérience réussisse, il faut que le plateau collecteur soit formé avec le même métal que le disque avec lequel on le touche, et qu'il ne soit point verni aux points de contact. Lorsque le plateau collecteur et le disque sont de nature différente, on place sur le plateau un morceau de papier humide : en le touchant dans cet endroit avec le disque, l'électricité passe de l'un à l'autre, et il n'y a point d'effet dû au contact du disque et du plateau. On pourrait aussi faire cette expérience en laissant le condensateur isolé, et touchant en même temps les deux plateaux avec les deux disques.

Dans ces expériences l'électricité ne provient pas de la pression; car, en soudant bout à bout deux lames métalliques (fig. 573), on les trouve encore dans deux états électriques opposés. En opérant avec une lame de cuivre et une lame de zinc soudées bout à bout, tenant la lame de zinc et touchant avec la lame de cuivre le plateau collecteur de l'électromètre, que nous supposons être également en cuivre, on trouve que le condensateur acquiert son maximum de charge par un seul contact et, par conséquent, qu'il passe plus d'électricité dans le condensateur que si la lame de zinc était isolée. On en concevra facilement la raison en observant : 1° que, le zinc communiquant avec le sol, il se développe instantanément plus d'électricité dans le cuivre, par la même raison que le plateau d'une machine électrique donne plus d'électricité quand les coussins communiquent avec le sol que quand ils sont isolés; 2° que, le développement de l'électricité étant instantané, à mesure que le cuivre abandonne au plateau collecteur celle qu'il a reçue, il se recharge aux dépens du zinc, et ce dernier aux dépens du sol, et, par conséquent, que l'électromètre doit prendre par un seul contact une tension égale à celle de la lame de cuivre, et, par suite, que dans un seul contact il acquiert toute la charge qu'il peut re-

cevoir. Si on tenait la lame par l'extrémité cuivre, en touchant le plateau collecteur de cuivre par l'extrémité zinc, on ne pourrait jamais parvenir à charger le condensateur, parce que, le zinc ayant déjà le maximum de tension qu'il peut acquérir par le contact du cuivre, celui-ci étant à l'état naturel, le zinc, en touchant de nouveau du cuivre isolé ou en communication avec le sol, ne lui cédera point l'électricité qu'il possède, et ne pourra point non plus y développer une électricité contraire. Mais si on plaçait sur le plateau collecteur un morceau de papier humide, que l'on toucherait avec la lame de zinc, les deux métaux ne seraient plus en contact immédiat, et, comme ils communiqueraient par un corps bon conducteur, l'instrument se chargerait.

Il est évident, d'après ce qui précède, que, si on touchait le plateau collecteur directement avec une lame de zinc que l'on tiendrait à la main, on chargerait le condensateur de la même manière. En opérant ainsi avec différents métaux, on trouve que le plomb, l'étain, le fer, le bismuth et l'antimoine donnent comme le zinc de l'électricité négative au condensateur, tandis que l'or, l'argent, le platine et le palladium lui donnent de l'électricité positive.

D'après les expériences de Volta, la plus petite différence entre les métaux suffit, lorsqu'ils sont en contact, pour les faire passer dans deux états électriques opposés : deux plaques de même métal, dont une a été frottée avec une troisième, diffèrent assez pour devenir électriques lorsqu'elles se touchent. On a fait beaucoup d'expériences pour déterminer l'état électrique qu'acquièrent les métaux par leur contact, mais elles n'ont pas été encore assez multipliées pour permettre d'en former un tableau complet. Nous donnons, d'après M. Berzélius, le tableau ci-après, dans lequel chaque métal est positif par rapport à ceux qui le précèdent, et négatif avec ceux qui le suivent :

Or.	Argent.	Plomb.
Iridium.	Cuivre.	Fer.
Rhodium.	Nickel.	Cadmium.
Platine.	Cobalt.	Zinc.
Palladium.	Bismuth.	Manganèse.
Mercure.	Étain.	

Les métaux ne sont pas les seuls corps qui deviennent électriques par leur contact. M. Becquerel a reconnu : 1° que les métaux prennent avec les acides l'électricité positive, et l'électricité négative avec les alcalis ; 2° que l'eau se comporte avec les métaux faci-

lement oxydables comme les acides; 3° que les métaux deviennent aussi électriques sous l'influence de la flamme du papier et de l'alcool. La propriété de développer de l'électricité par le contact paraîtrait donc appartenir à tous les corps; mais, pour la plupart, les tensions sont si faibles qu'il faut des instruments d'une sensibilité extrême pour les reconnaître.

Volta désigne sous le nom de *force électro-motrice* une force qui se développe dans le contact de deux corps et par le contact même. Cette force produit un développement instantané d'électricité, à la suite duquel un des corps prend l'électricité positive, l'autre l'électricité négative, si tous deux sont isolés. La tension acquise par les deux corps a pour limite la puissance électro-motrice elle-même, qui s'oppose à la combinaison des deux électricités et suspend la conductibilité; mais si les deux corps recevaient chacun une addition égale d'électricités contraires, les deux charges additionnelles se combineraient. Si un des corps était mis en contact avec le sol, sa tension deviendrait nulle, et Volta admet que celle de l'autre serait doublée, de sorte que la différence algébrique des deux tensions est constante. Volta suppose encore que si les deux plaques en contact étaient mises en communication avec un même corps conducteur, ayant une force électro-motrice nulle ou insensible, les deux électricités se recomposeraient continuellement à travers le troisième corps, tandis que la force électro-motrice développerait constamment de nouvelle électricité entre les deux premiers.

1020. *Pile de Volta.* La pile de Volta se compose toujours de trois corps : deux sont métalliques, ou du moins bons conducteurs, le troisième est un liquide. Ces corps sont ordinairement du cuivre rouge, du zinc et de l'eau acidulée; ils sont disposés les uns à la suite des autres et toujours dans le même ordre : chaque période porte le nom d'*élément.*

La disposition la plus simple consiste à donner aux plaques métalliques la forme de disques, et à les superposer dans le même ordre, en interposant entre chaque couple une rondelle de papier ou de drap, mouillée avec de l'eau acidulée. La pile peut être montée sur un corps isolant ou conducteur. Les effets que nous allons décrire sont les mêmes.

Lorsqu'on touche les deux extrémités de la pile avec les deux mains préalablement mouillées, on éprouve une commotion analogue à celle qui résulte de la décharge d'une bouteille de Leyde, et qui se renouvelle à chaque contact. Quand on met les extré-

mités de la pile en contact avec les muscles et les nerfs d'un cadavre récent, les muscles éprouvent de violentes contractions. Enfin si une communication permanente est établie par un fil métallique ou un liquide, il se produit de la chaleur, des effets magnétiques et chimiques que Volta n'avait pas prévus, et que nous exposerons plus loin avec tous les détails nécessaires. Voici l'explication que Volta a donnée de cette puissante machine électrique.

Mettons en communication avec le sol un disque de cuivre (fig. 574), et plaçons au-dessus un disque de zinc : d'après la théorie de Volta, le zinc acquerra une certaine quantité d'électricité que nous représenterons par a, et le cuivre sera à l'état naturel. Au-dessus du disque de zinc plaçons un drap humide h; ce corps étant bon conducteur partagera l'électricité de z; mais la force électro-motrice produira une nouvelle décomposition de fluide naturel, telle que z reprendra sa tension primitive, et une nouvelle quantité de fluide s'écoulera dans le sol. Sur le drap h mettons un second couple $z'c'$ de zinc et de cuivre disposé comme le premier; c' prendra de l'électricité à h comme corps conducteur, et la tension primitive de z s'établira sur h, c' et z'; mais, en admettant que dans le couple $z'c'$, z' doit avoir sur c' la même différence de tension que z sur c, z' prendra la tension $2a$; en continuant ainsi on voit qu h' et c'' prendront la tension $2a$, z'' la tension $3a$, et ainsi de suite, de sorte que

$z, z', z'', z''' \ldots z^{(n)}$, auront les tensions $a, 2a, 3a \ldots na$,
$c, c', c'', c''' \ldots c^{(n)}$, auront les tensions $o, a, 2a \ldots (n-1)a$,
$h, h', h'', h''' \ldots h^{(n-1)}$, auront les tensions $a, 2a, 3a \ldots na$.

Si on avait monté la pile en sens contraire, c'est-à-dire si le zinc communiquait avec le sol, la distribution de l'électricité serait la même, seulement elle serait négative.

Si la pile, au lieu de communiquer avec le sol, était isolée, elle se chargerait aux dépens d'elle-même des deux électricités : une moitié renfermerait l'électricité positive et l'autre l'électricité négative; les tensions des disques également éloignés du milieu seraient égales, et elles iraient en croissant du milieu, où elles seraient nulles, jusqu'aux extrémités, où elles seraient à leur maximum : car, si on monte deux piles égales en sens contraire, communiquant par leurs bases inférieures avec le sol, les disques inférieurs de nature différente étant à l'état naturel, rien ne sera changé si on suppose les piles réunies par leurs parties inférieures, au moyen d'un corps bon conducteur, non électro-moteur, par exemple

au moyen d'une rondelle de drap mouillée. Alors on aura une pile isolée, dans chaque moitié de laquelle l'électricité sera répartie comme dans une pile en contact avec le sol. Mais la tension des pôles sera évidemment deux fois plus petite que dans une pile d'un même nombre d'éléments communiquant avec le sol par une extrémité.

1021. Telle est la théorie que Volta a donnée lui-même de son admirable instrument; mais cette théorie n'est pas admissible. Elle repose sur deux hypothèses : la première, que la différence de tension entre deux éléments consécutifs est constante, ce qui n'est point démontré; la seconde, que le liquide n'agit que comme conducteur, ce qui n'est point exact, car, en remplaçant l'eau acidulée par une dissolution alcaline, les pôles de la pile sont intervertis. D'ailleurs, dans les piles isolées, les tensions sont inappréciables, tandis que, d'après la théorie de Volta, elle serait seulement la moitié de celle qu'on obtiendrait en mettant une des extrémités en contact avec le sol.

En outre, les physiciens ne sont pas d'accord sur les expériences par lesquelles Volta a démontré la production de l'électricité par le contact. M. de la Rive pense que les effets observés proviennent d'une action chimique produite par l'air humide, ou la main, sur le métal le plus oxydable, et que, quand on se met à l'abri de toute action chimique, il n'y a point de dégagement d'électricité; d'autres physiciens, parmi lesquels nous citerons MM. Ohm, Pfaff et Poggendorff, soutiennent les faits avancés par Volta.

1022. J'ai essayé d'éclaircir le point important dont il s'agit (*A. C. et P.*, t. II), et je résumerai les faits que j'ai observés.

Lorsqu'on touche le plateau supérieur d'un condensateur avec un métal qu'on tient à la main, et le plateau inférieur avec le doigt, on observe presque toujours une certaine divergence entre les feuilles d'or. Cette divergence est indépendante des dimensions du corps, du nombre des points de contact, de la durée du contact, de la pression et de la température.

Si on touche le plateau supérieur du condensateur avec des fils soudés bout à bout, l'effet est le même que si le métal touché était en contact immédiat avec le plateau.

Quand on tient avec les doigts le fil métallique, et par l'intermédiaire de lames de baudruche, de papier, ou de cuir, l'effet est plus petit que quand le métal est touché directement, et d'autant plus que les lames sont plus nombreuses.

Des fils métalliques de différente nature étant réunis bout

à bout, si on tient dans les doigts les extrémités voisines des soudures, en touchant le plateau par une quelconque des extrémités, on obtient le même effet, et la déviation est sensiblement égale à la moyenne des déviations qui seraient produites séparément par chaque métal.

L'effet produit par un même métal varie avec la nature du liquide dont on a mouillé les doigts. Les alcalis produisent plus d'effet que les acides, et pour l'argent, le platine et l'or, les effets sont de signes contraires.

Dans toutes ces expériences, on peut remplacer les doigts par un fil d'or ou de platine soutenu par deux manches isolants. On place le métal dont on veut connaître l'action sur le plateau supérieur du condensateur, on le recouvre d'une membrane mouillée de différents liquides que l'on fait communiquer par le fil d'or avec le plateau inférieur; on peut aussi employer des capsules métalliques pleines de différents liquides.

Pour un même métal et une même dissolution acide ou alcaline, l'effet produit est sensiblement indépendant du degré de condensation et de l'énergie de l'action chimique, quand elle existe.

En employant des disques de cuivre et de zinc soutenus par des manches isolants, que l'on met en contact entre eux, et ensuite avec les plateaux du condensateur, on parvient à donner à celui-ci une charge quelconque. La pression ou le frottement qui précèdent la séparation normale sont sans influence. Lorsqu'on sépare les disques en les faisant glisser l'un sur l'autre, on n'obtient aucun signe d'électricité. En diminuant l'étendue du contact apparent des disques, l'effet est diminué dans la même proportion. Les autres métaux ont donné des résultats analogues, mais plus petits. Dans ces expériences, les disques en contact se comportent comme un condensateur dont la lame isolante serait une couche d'air.

Ces expériences répétées avec des disques vernis sur les surfaces qui doivent être mises en contact, et en établissant la communication par des fils métalliques isolés, ont donné les mêmes résultats. La nature de l'arc métallique est sans influence. Lorsque l'arc renferme un liquide, et que le liquide communique à deux lames métalliques de même nature, l'effet produit est le même que si l'arc était tout métallique; quand les lames sont de nature différente, l'effet est le même que si les disques étaient de la nature des lames mouillées et communiquaient par un arc du liquide.

Pour observer la différence des effets produits lorsque les disques

sont en communication par un arc métallique ou liquide, j'ai remplacé le plateau supérieur doré du condensateur par un plateau de zinc. En établissant la communication avec les doigts, la déviation a été de + 20°; en l'établissant par un arc métallique quelconque, elle a été de — 3°. Les autres métaux se sont comportés de la même manière.

Lorsque les deux plateaux d'un condensateur sont en communication par un arc formé de différents liquides conducteurs, l'effet ne dépend que des liquides qui touchent les lames métalliques; il est indépendant du nombre et de la nature des liquides intermédiaires.

On obtient des effets très-sensibles par le contact de certains métaux avec des liquides sans action sur eux. Si on prend un tube de verre recourbé en U, rempli d'alcool à 45°, en plongeant une tige métallique dans une des branches, tenant l'autre fermée avec le doigt et touchant un des plateaux du condensateur avec l'extrémité de la tige métallique, on obtient 3° avec le fer, 12° avec le zinc et 10° avec l'étain. Ces effets ne proviennent pas de l'action de l'alcool sur le doigt, car ils seraient les mêmes pour tous les métaux, ce qui n'est pas; ils ne peuvent pas résulter, non plus, de l'influence de l'humidité de l'air sur la partie de la tige métallique qui est hors du liquide, car, si on immerge complétement la lame dans le liquide, et si on la touche par un fil d'or ou de platine communiquant avec un des plateaux, on obtient le même résultat. Le fer plongé dans une dissolution de potasse produit une déviation de 9°; et on sait que cet alcali est sans action sur le fer.

1023. Les conséquences suivantes résultent des faits que je viens de rapporter:

1°. Les métaux, dans leur contact, produisent de l'électricité, comme Volta l'avait annoncé, et sans qu'il soit possible d'attribuer cet effet au frottement ou à une action chimique du milieu environnant.

2°. Dans une chaîne formée de plusieurs métaux, les effets produits sont les mêmes que si les métaux extrêmes étaient immédiatement en contact, comme Volta l'avait dit, mais en déduisant ce fait d'expériences mal interprétées.

3°. Lorsque des métaux communiquent par un arc métallique, et ensuite par un arc liquide, leur charge électrique augmente beaucoup, et, en général, change de signe.

4°. La théorie de la tension de la pile, telle que Volta l'a donnée, est inexacte, attendu que les principaux effets proviennent de l'ac-

tion des métaux sur les liquides, et que celle des métaux entre eux ne tend qu'à diminuer l'effet produit; alors l'élément d'une pile n'est pas formé de deux plaques en contact, mais de deux plaques de nature différente séparées par un liquide.

5°. Lorsque deux métaux sont réunis par une chaîne formée de plusieurs liquides communiquant entre eux, l'effet produit est le même que si les liquides qui touchent les métaux étaient en contact immédiat : c'est pour les liquides une loi analogue à celle que Volta avait trouvée pour les métaux.

6°. Dans le contact des métaux entre eux, l'électricité développée ne peut pas être attribuée au frottement, à la pression ou à une action chimique du milieu environnant; et, pour certains métaux et certains liquides, il y a production d'électricité sans qu'il soit possible d'admettre une action chimique entre les deux corps.

1024. Ainsi, il y a bien de l'électricité dégagée par le contact des corps, comme Volta l'avait annoncé, et dans des circonstances où il est impossible d'admettre une action chimique. D'ailleurs, dans l'examen que nous avons fait des circonstances qui accompagnent le dégagement de l'électricité par le frottement, nous avons vu que toutes, sans exception, étaient sans influence, et que tout se bornait à mettre les corps en contact et à les séparer, ou en les faisant glisser les uns sur les autres, ou en les séparant normalement, et, par conséquent, qu'on ne pouvait attribuer les effets produits qu'au contact, et nullement à l'intervention d'une action chimique de l'air, parce qu'ils se produisent également dans l'acide carbonique. Mais il est impossible de déduire de là une explication des effets de la pile : car, pour qu'elle se recharge immédiatement quand on a touché les deux pôles, et pour que, les pôles étant mis en communication, le circuit soit parcouru par un courant électrique, il faut que la pile renferme une source permanente d'électricité; et comme le courant électrique qui parcourt la pile et le fil qui réunit les pôles possède une certaine puissance dynamique capable de vaincre une certaine résistance, la cause du courant ne peut pas résider dans un circuit en repos, dont les parties ne changent ni de nature ni de température.

Cette dernière considération surtout rend très-probable l'opinion que les effets de la pile résultent des actions chimiques qui se produisent entre les liquides et les métaux qui la constituent, et non de leur contact. A la vérité, dans quelques circonstances, il est difficile de constater l'existence et la nature de l'action chimique

qui produit le courant électrique; mais nous verrons qu'il faut de si faibles actions chimiques pour produire des courants d'une assez grande intensité, que l'impossibilité dans laquelle on se trouve quelquefois de les assigner, ne doit pas être considérée comme une objection bien puissante au principe général qui repose sur un si grand nombre de faits. Il serait possible cependant que ce fût l'électricité résultant du contact qui produisît, au premier instant, le courant dans les piles où l'action chimique ne se manifeste que quand le circuit est formé, comme dans celles dont le zinc est amalgamé; la décharge instantanée des électricités accumulées aux pôles produirait une action chimique qui deviendrait alors la cause permanente du courant. Quoi qu'il en soit, nous le répétons, il faut que la source de l'électricité de la pile dépense une action mécanique égale à celle que peut manifester le circuit, en vertu du principe de la conservation des forces vives dans un système quelconque; et rien ne peut se produire d'une manière continue dans des corps en contact qui n'éprouvent aucun changement.

1025. M. de la Rive qui a toujours considéré les effets de la pile comme résultant des actions chimiques, en a donné une explication que nous devons rapporter.

Considérons une plaque de zinc plongée dans de l'eau acidulée : par suite de l'action chimique qu'elle éprouve, le zinc prend l'électricité négative et le liquide l'électricité positive; mais ces électricités se recombinent à travers le liquide à une petite distance de la surface de la lame métallique, de sorte qu'un électroscope mis en communication avec la lame de zinc ou le liquide ne se chargerait pas, ou se chargerait très-peu. Si on plonge dans le même liquide une plaque de cuivre, rien ne sera changé; mais si les deux lames communiquent par un fil métallique, une partie de l'électricité du liquide se portera sur la lame de cuivre et parcourra le fil pour se combiner à celle du zinc; il se produira, par conséquent, un courant. Examinons maintenant ce qui se passera dans une pile isolée, composée d'éléments égaux, par exemple dans une pile à auges. Il est facile de voir que des quantités égales d'électricités contraires se neutraliseront à chaque instant dans chaque couple, que les plaques extrêmes se chargeront d'électricités de signes contraires qui tendront à se réunir à travers la pile, qui se réuniront en effet, mais en se reproduisant sans cesse par la permanence de l'action chimique.

Ces tensions polaires, qui résultent de l'imparfaite conductibilité

de la pile, seront évidemment proportionnelles à la résistance que la pile oppose à la réunion des deux électricités, c'est-à-dire aux nombres des éléments : car d'après les expériences de M. de la Rive, dont nous parlerons plus loin, la conductibilité d'une masse liquide interrompue par des diaphragmes métalliques, varie en raison inverse de leur nombre. Les tensions polaires devront varier aussi en sens contraire de la conductibilité du liquide placé dans les auges; et c'est, en effet, ce que M. de la Rive a reconnu par l'expérience. La réunion des électricités polaires devra nécessairement établir des tensions décroissantes dans les éléments qui sont de plus en plus rapprochés du centre de la pile, et dans l'élément du centre, où la réunion a lieu, la tension sera nulle. Il est important de remarquer que ces tensions de signe contraire, qui se produisent dans les deux moitiés de la pile, ne doivent pas être considérées comme des tensions statiques, mais comme des tensions dynamiques, qui subsistent au milieu du mouvement général de l'électricité qui se manifeste dans la pile, mouvement qui produit la recomposition des fluides dans chaque élément, et celle des fluides polaires à travers la pile. Si la pile, au lieu d'être isolée, avait un de ses pôles en communication avec la terre, l'autre prendrait une tension beaucoup plus considérable, parce qu'une partie de son électricité ne serait plus neutralisée par celle du pôle qui a cessé d'être isolé.

Supposons maintenant que les pôles de la pile soient réunis par un fil métallique, ou un corps quelconque plus ou moins bon conducteur. Les électricités polaires auront deux chemins pour se réunir, la pile et le conducteur extérieur : elles se partageront nécessairement entre eux en raison de leur conductibilité; mais le courant établi traversera la pile, augmentera l'énergie de l'action chimique, par suite celle du courant lui-même, qui deviendra constant par l'accroissement des résistances.

Telle est la théorie proposée par M. de la Rive : elle a été combattue par plusieurs physiciens, et principalement par M. Poggendorff; mais comme elle satisfait à l'ensemble des faits connus, et que celle de Volta est inadmissible, nous l'adopterons.

1026. *Différentes formes de piles.* La pile voltaïque telle que nous venons de la décrire présente plusieurs inconvénients que l'on a cherché à faire disparaître par d'autres dispositions. Le premier consiste en ce que, les disques s'oxydant facilement, toutes les fois qu'on remontait la pile, il fallait nettoyer les faces des disques qui devaient être en contact, sans quoi on n'obtenait qu'une très-

petite partie de l'électricité qu'elle pouvait développer. Le second consiste en ce que, chaque rondelle de carton supportant le poids des disques supérieurs, le liquide s'en écoule, elle devient moins bon conducteur, et le liquide, en ruisselant le long de la pile, la décharge en partie. On a fait disparaître ces deux inconvénients en soudant les disques et en plaçant la pile dans une position horizontale.

1027. La figure 574 A représente une pile composée d'une série de plaques de cuivre et de zinc soudées bout à bout et plongeant par leurs extrémités, dans des verres remplis de liquides conducteurs. Il est évident que cet appareil satisfait à toutes les conditions nécessaires au développement de l'électricité : Volta le désigne sous le nom d'*appareil de tasses à couronne.*

1028. L'appareil fig. 575, désigné sous le nom de *pile à auges*, est formé de couples rectangulaires soudés et mastiqués avec une matière isolante dans une caisse horizontale; on remplit les intervalles des plaques avec un liquide conducteur : il est évident que l'effet produit doit être le même que dans la pile verticale.

1029. L'appareil fig. 576 est une autre forme de pile, due à Wollaston. Les plaques de cuivre et de zinc sont soudées par un prolongement étroit et disposées comme l'indiquent les figures 577, 578 : la lettre *c* désigne le cuivre, et la lettre *z* le zinc. Lorsqu'on veut mettre la pile en activité, on descend la barre horizontale AB de la fig. 576 de manière à faire plonger les plaques dans les vases M, M'.... remplis de liquide conducteur. Nobili a proposé de percer les éléments de la pile de Wollaston de manière que lames de zinc et de cuivre soient comme des peignes et que les parties pleines soient en regard. On obtient ainsi le même effet avec beaucoup moins de dépense en zinc et en acide. Il donne 26 millimètres de jour 13 millimètres de plein.

1030. On emploie quelquefois plusieurs piles réunies. On peut réunir les piles de deux manières : 1° en mettant en contact les pôles négatifs entre eux, et les pôles positifs entre eux; 2° en réunissant le pôle négatif de la première avec le pôle positif de la seconde, et ainsi des autres. Dans le premier cas on augmente l'étendue des éléments. Dans le dernier, on produit le même effet qu'avec une pile dont le nombre des couples serait égal à la somme des couples des piles. On emploie la première disposition pour produire des effets qui dépendent de l'étendue des couples; la seconde pour produire ceux qui dépendent de la tension.

1031. On fait quelquefois usage d'appareils voltaïques formés d'un seul couple de grandes dimensions : la disposition la plus commode est représentée fig. 579; le couple est formé de deux plaques de cuivre et de zinc, séparées par des bandes de carton ou de drap, et roulées en spirale sans se toucher; on introduit cet appareil dans un vase plein de liqueur conductrice, et on fait communiquer les deux plaques par le corps à travers lequel on veut faire passer le courant.

1032. Lorsqu'il s'agit de produire de grands effets, mais d'une courte durée, on emploie une disposition imaginée par M. Faraday, qui permet de monter une pile d'un grand nombre d'éléments dans un temps très-court. Les éléments de la pile de Faraday sont disposés comme ceux de Wollaston, mais on les plonge dans la même auge. L'effet est beaucoup plus petit que si chaque élément plongeait dans un vase séparé à paroi isolante; mais dans un instant on peut mettre en action un très-grand nombre d'éléments. M. Munck emploie une autre disposition plus avantageuse : les lames de cuivre et de zinc sont égales, soudées suivant une ligne verticale, et maintenues par du liége, à une distance de 2 millimètres. Les figures 991 et 992 représentent l'arrangement de cette nouvelle pile.

1033. *Piles à effets constants.* Les piles dont nous venons de parler ont un inconvénient très-grave : le plus grand effet a lieu au premier instant, il diminue ensuite rapidement, et d'autant plus qu'il était plus considérable. Cette variation d'intensité provient de l'hydrogène et du zinc qui se dépose sur la face cuivre opposée à la face zinc, et qui tend à produire des courants en sens contraire. On est parvenu de différentes manières à construire des piles à effet constant; mais dans presque toutes se trouve cette circonstance, que chaque élément renferme deux liquides séparés par un corps poreux, et dans lesquels plongent des lames métalliques de même nature ou de natures différentes.

1034. *Pile de M. Becquerel.* Cette pile, la première à effet constant qui a été construite, consiste en deux vases de verre renfermant, l'un une dissolution concentrée de potasse, l'autre de l'acide nitrique; ces liquides communiquent par un siphon de verre rempli d'argile humectée par une dissolution de sel marin; une lame de platine plonge dans chaque vase; lorsquelles sont réunies par un fil métallique, il se produit un dégagement d'oxygène sur la lame qui plonge dans la potasse, et le fil extérieur est parcouru par un courant constant, mais d'une faible puissance magnétique. L'intensité du

courant ne commence à diminuer que quand, au bout de quelque temps, le nitrate de potasse produit cristallise dans le tube. M. Becquerel attribue la force électro-motrice de l'appareil à l'action chimique de l'acide et de l'alcali. On pourrait placer un des deux liquides dans un vase de terre à porcelaine, sans vernis, et ce vase dans un autre de verre contenant l'autre liquide; mais le nitrate de potasse qui se formerait dans les pores ferait éclater le vase. Plusieurs éléments pourraient être réunis à la méthode ordinaire. Ces piles ne sont pas employées, parce que celles que nous allons décrire ont une plus grande puissance.

1035. *Pile de M. Daniell.* Cette pile, dont l'usage est maintenant très-répandu, se compose d'une dissolution de sulfate de cuivre, à la partie supérieure de laquelle se trouvent des cristaux du même sel destinés à maintenir la dissolution saturée, et d'une dissolution de sel marin; ces deux liquides sont séparés par une membrane mince, de la toile à voile très-serrée, du cuir perméable à l'eau, des planches très-minces de bois de sapin, du plâtre, de la porcelaine seulement dégourdie. Une lame de cuivre plonge dans la dissolution de sulfate de cuivre, et une lame de zinc dans celle de sel marin. Ces piles ont une grande puissance, et n'éprouvent pendant longtemps que de très-faibles variations d'intensité. On peut leur donner des formes très-variées. Les figures 993 et 994 représentent celles qui ont été adoptées par l'inventeur. Chaque élément est formé d'un cylindre en cuivre mince *abcd* (fig. 994), fermé par le bas et garni vers le haut d'un petit cylindre *efgh* de même nature et percé d'un très-grand nombre de petits trous; c'est dans l'espace annulaire compris entre les deux cylindres qu'on place les cristaux de sulfate de cuivre; *iklm* est un cylindre formé d'une membrane mince, de toile, ou des différentes substances perméables aux liquides dont nous avons parlé; enfin *np* est un cylindre de zinc. La dissolution de sulfate de cuivre se place dans le vase de cuivre, et la dissolution de sel marin dans le cylindre perméable *iklm*. Les éléments se réunissent comme l'indique la fig. 993. Pendant que la pile est en action, il se dépose du cuivre métallique contre la paroi intérieure du vase de cuivre. On peut placer le réservoir à cristaux de sulfate à l'extérieur comme l'indique la figure 995, et donner au vase de cuivre une forme allongée, en ne plaçant les cristaux qu'aux extrémités (fig. 996). On pourrait aussi placer un vase de cuivre lesté par du sable au centre d'un vase de verre, autour le sac et un cylindre de zinc. Les membranes

minces, comme les vessies, produisent plus d'effet que toutes les autres cloisons; mais elles ont une puissance d'endosmose qui fait passer la dissolution de sulfate de cuivre dans celle de sel marin, circonstance que tend à diminuer l'effet de la pile. Les autres matières que nous avons indiquées ne présentent pas cet inconvénient au même degré; mais le courant est plus faible; les diaphragmes en terre à porcelaine, seulement dégourdie, paraissent les plus convenables, quand l'intensité du courant doit être longtemps maintenue. Dans ces piles il ne se dépose point d'hydrogène sur le cuivre, parce que l'hydrogène décompose l'oxyde de cuivre du sulfate; le cuivre réduit s'applique avec plus ou moins d'adhérence sur la lame de cuivre.

1036. *Pile de M. Grove.* Cette pile, quoique de très-petites dimensions, produit de très-grands effets. Chaque élément se compose d'un petit vase de verre au fond duquel on a mastiqué la tête d'une pipe de terre : le vase de verre renferme de l'acide nitrique, et le petit vase de terre de l'eau acidulée; une lame de platine plonge dans le premier liquide, et une lame de zinc dans le second. La tête de pipe pourrait être remplacée par un vase d'une dimension quelconque. L'hydrogène dégagé décompose l'acide nitrique en produisant un faible dégagement d'acide hypo-azotique.

1037. *Pile de M. Bunsen.* L'élément se compose (fig. 997) de quatre pièces solides de forme cylindrique, qui s'emboîtent les unes dans les autres. La plus extérieure est un bocal de verre plein d'acide nitrique du commerce; la seconde un cylindre creux de charbon ouvert par les deux bouts, plongeant dans l'acide jusqu'au trois quarts de sa hauteur, et terminé par un anneau de cuivre bien décapé, adapté par frottement, sur lequel est soudé une patte métallique recourbée, destinée à établir la communication avec le pôle contraire de l'élément suivant : le cylindre s'obtient en calcinant dans un moule de tôle un mélange intime de coke et de houille grasse finement pulvérisée, tournant le cylindre, le trempant dans de la mélasse et le calcinant de nouveau; la troisième, nommée diaphragme, est un vase en terre poreuse dont la paroi extérieure est à une très-petite distance du cylindre de charbon : on y introduit une dissolution formée de sept à huit parties d'eau et d'une partie d'acide sulfurique; enfin, la dernière est un cylindre creux de zinc, surmonté d'une patte de même métal. On voit, par cette description, que l'élément de M. Bunsen ne diffère de celui de M. Grove que par le cylindre de charbon qui remplace la lame de platine; sous les

mêmes dimensions, il lui est très-peu inférieur; mais il est plus constant et plus économique.

1038. *Pile de M. Smée.* Cette pile ne contient qu'un seul liquide: aussi elle est moins constante dans ses effets que les précédentes; mais elle est très-puissante, et très-souvent employée dans la galvanoplastie.

Chaque élément (fig. 997) se compose d'une lame de cuivre argentée et platinée par un procédé que nous décrirons bientôt, placée entre deux lames de zinc *z, z'*, de plus petites dimensions, réunies par un étrier Z; les petites tiges P, P' communiquant avec la lame de platine, portent les fils conducteurs; une traverse en bois A maintient les trois lames dans une position invariable. On plonge chaque élément dans un vase de verre renfermant un liquide formé de sept parties d'eau et d'une partie d'acide sulfurique; la traverse en bois A, en s'appuyant sur les bords du vase, soutient l'appareil.

M. Smée employait des lames de platine platinées, parce qu'il avait reconnu que les rugosités de la surface empêchaient l'hydrogène d'y adhérer. C'est M. Boquillon qui a substitué aux lames de platine des lames de cuivre argentées et platinées; cette modification rend l'appareil moins cher sans lui faire rien perdre de sa puissance.

1039. *Pile de M. Schœnbein.* L'élément de cette pile se compose d'un vase cylindrique de fonte, et d'un vase d'argile poreuse placé dans le premier. Le vase de fonte contient un mélange de trois parties d'acide nitrique et d'une partie d'acide sulfurique; le cylindre d'argile renferme un mélange de 12 volumes d'eau et d'un volume d'acide sulfurique, et une lame de zinc amalgamée. Cette pile est très-puissante.

1040. *Pile du prince B. Bagration* Les éléments sont formés d'un vase imperméable non métallique, rempli de terre humectée par une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque (sel ammoniac), et dans laquelle sont placées, à une petite distance, une lame de cuivre et une plaque de zinc. La pile devient bientôt constante, et peut être maintenue dans cet état des mois entiers, pourvu qu'on humecte la terre de temps en temps (*Arch. de l'elect.*, t. IV).

M. Desbordeaux a annoncé récemment qu'en remplissant les vases de la pile de Wollaston d'une dissolution saturée de sulfate de zinc, à laquelle on ajoute un peu d'eau acidulée et de sulfate de cuivre, la pile fonctionne d'une manière très-régulière.

Dans toutes les piles, quelle que soit leur disposition, il est très-avantageux de couvrir la surface de zinc d'une couche mince de mercure; parce qu'alors le zinc n'est point attaqué quand les extrémités de la pile ne sont point en communication, et que, quand cette communication est établie, il n'y a de zinc dissous que celui qui correspond au courant produit. L'amalgamation du zinc s'obtient en frottant le zinc avec du mercure et de l'eau acidulée par l'acide sulfurique.

On a encore imaginé d'autres espèces de piles hydro-électriques moins employées, et dont il sera question plus loin.

1041. *Piles secondaires de Ritter.* Les piles de Ritter sont formées de disques de cuivre et de carton humide entremêlés. Elles ne développent point d'électricité par elles-mêmes; mais, quand elles ont été mises en communication avec une pile ordinaire, elles produisent, lorsqu'on touche leurs pôles, des décharges et des décompositions chimiques comme la pile ordinaire, mais qui vont en s'affaiblissant. Les pôles des piles de Ritter sont contraires à ceux de la pile avec lesquels le contact a eu lieu. Ritter a observé que plus il y avait d'intermittences dans les disques, leur nombre restant le même, plus la conductibilité était petite, et plus la charge que la pile pouvait recevoir était grande. Il est probable que l'effet des piles de Ritter dépend des substances acides et alcalines que le courant de la pile voltaïque a déposées sur les faces des disques métalliques, pendant que la circulation était établie.

1042. *Piles sèches.* On a fait beaucoup d'essais pour construire des piles sans l'intervention des conducteurs liquides; on a obtenu des appareils qui ont une tension sinon permanente, du moins d'une assez longue durée, mais dont la puissance est en général très faible. La meilleure disposition fut indiquée par Zamboni en 1812. Elle consiste à employer des feuilles de papier recouvertes d'un côté d'une lame très-mince de zinc ou d'étain et de l'autre d'une couche de peroxyde de manganèse, et qu'on place les unes sur les autres en les maintenant fortement serrées. M. Delezenne, qui s'est beaucoup occupé de la construction et des effets des piles sèches, emploie du papier étamé, et fixe le peroxyde de manganèse avec de la colle animale; les feuilles sont pressées par des plaques de cuivre d'une plus grande surface, maintenues par des cordons de soie. Quand ces piles ont été récemment construites, elles jouissent de toutes les propriétés des piles hydro-électriques : elles donnent des étincelles, des commotions, et produisent des

courants qui agissent sur l'aiguille aimantée et décomposent l'eau. Le papier doit avoir un certain degré d'humidité. L'intensité des courants augmente à mesure que l'humidité de la pile est plus grande, mais elle décroît d'autant plus rapidement que les feuilles sont plus humides et qu'elles ont de plus petites dimensions; elle augmente avec la pression exercée sur les plaques polaires. L'action magnétique du courant augmente très-lentement avec le nombre des éléments; il n'en est pas de même de la tension. Les effets diminuent avec le temps, les tensions polaires moins que les autres propriétés, par la dessiccation du papier et l'altération des lames d'étain, mais d'autant plus lentement que les éléments ont une plus grande surface; et ils finissent toujours par disparaître. Les piles qui sont environnées de soufre ou de résine s'éteignent promptement. Les piles sèches rentrent complétement dans la classe des piles ordinaires (*Arch. de l'électr.*, t. v).

1043. *Considérations générales sur les effets des piles.* Les effets des piles sont produits, ou par la tension qui se développe aux pôles, ou par le mouvement de l'électricité dans le corps qui établit la communication des deux pôles : les premiers augmentent avec le nombre des éléments, et sont indépendants de leur étendue. Les effets produits par les courants sont ou magnétiques, ou calorifiques, ou chimiques : et tous augmentent avec la faculté conductrice du liquide de la pile; mais l'influence de la grandeur des éléments et de leur nombre est très-variable. Nous reconnaîtrons plus tard que l'intensité du courant qui provient d'une pile formée d'éléments égaux est proportionnelle au nombre des éléments, et en raison inverse de la résistance de chacun deux et de celle du corps quelconque qui réunit les pôles. Il résulte de là que l'intensité d'un courant est sensiblement indépendant du nombre des éléments, quand le fil qui réunit les pôles est gros et court, que l'influence du nombre des éléments augmente à mesure que la partie extérieure du circuit présente plus de résistance, et que, pour des résistances très-faibles, des éléments d'une grande étendue sont utiles, parce qu'ils présentent moins de résistance au courant.

1044. On doit à M. Mattencci les observations suivantes : 1° le maximum d'effet produit par une pile ordinaire a lieu à l'instant de la fermeture du circuit ; 2° le décroissement d'intensité du courant est d'abord très-rapide, et d'autant plus que le courant est plus puissant; 3° ce décroissement continue pendant un temps plus ou moins long, après lequel l'intensité reste constante; 4° le temps nécessaire pour

que la pile parvienne à un état permanent est d'autant plus long que le courant primitif était plus énergique, et que la pile renferme un plus grand nombre d'éléments; 5° les piles chargées d'avance et dont on n'a point fermé le circuit atteignent plus vite le terme de leurs variations; 6° une pile parvenue à son régime permanent recouvre, quand on interrompt le circuit, une partie de la force qu'elle avait perdue; et, en rétablissant les communications, le courant reprend une partie de son intensité primitive, d'autant plus grande que la durée de l'interruption a été plus longue.

D'après M. Faraday, le décroissement de l'intensité du courant dans un circuit fermé provient des actions chimiques qui accumulent sur la face cuivre opposée à la face zinc, de l'hydrogène, du zinc et des bases qui tendent à produire des courants contraires. Cette explication est maintenant parfaitement démontrée; ces dépôts ne sont point enlevés par le frottement : car, si on forme une pile avec des disques montés sur un axe horizontal, et qui plongent dans une auge pleine de liquide et garnie de brosses, la rotation permanente laisse subsister la diminution d'intensité dont il est question.

1045. Lorsque la surface d'une des lames d'un élément reste constante et qu'on augmente progressivement celle de l'autre, l'intensité du courant croît beaucoup plus rapidement, si c'est la lame de cuivre dont on augmente l'étendue. Tous les couples que l'on peut former en combinant entre eux le zinc, le fer, le plomb, l'étain, le cuivre, le laiton, l'argent, l'or, le platine, donnent ce résultat général, qu'en augmentant la surface du métal le moins attaqué, on augmente beaucoup plus l'effet que par le changement contraire. L'effet d'un couple cuivre et zinc à plaques égales ne change pas, quand on réduit la plaque de zinc à 1/7 de son étendue, si on augmente celle du cuivre de 1/8 ou de 1/7 au plus. On peut ainsi épargner beaucoup de zinc dans la construction des piles (M. Marianini). Quand les lames sont placées à une petite distance, et qu'on fait varier leurs grandeurs relatives de manière que leur somme reste constante, le maximum d'effet a lieu quand les plaques sont égales (Bigeon). L'effet produit par les mêmes plaques plongées dans le même liquide augmente avec le rapprochement des plaques, mais suivant une loi beaucoup moins rapide que la raison inverse de la distance.

1046. Quant aux liquides employés pour monter la pile, on a reconnu que les dissolutions salines neutres agissent avec moins d'énergie que les dissolutions de sels acides, et ces dernières, à quel-

ques exceptions près, moins que les acides, et surtout l'acide nitrique; et enfin que l'intensité du courant augmente avec la quantité de matière dissoute dans l'eau, excepté pour l'acide sulfurique, dont le maximum d'action a lieu quand il est combiné avec 0,5 ou 0,70 d'eau. Le mélange le plus convenable pour obtenir un courant d'une grande intensité, sans dissoudre trop de zinc, est formé d'eau contenant 1/80 d'acide sulfurique et 1/80 d'acide nitrique.

Pour une même pile, montée avec le même liquide, la force du courant augmente beaucoup quand on chauffe le liquide.

1047. Comme le développement de l'électricité dans les piles ordinaires est très-rapide, elle peut être isolée par tous les corps qui ne sont pas très-bons conducteurs, c'est-à-dire par tous les corps non métalliques; il n'est point alors nécessaire d'employer toutes les précautions qui sont indispensables pour isoler les corps chargés d'électricité développée par le frottement.

Nous allons maintenant étudier avec détails les différentes classes de phénomènes produits par la pile.

§ 2. *Effets produits par la tension des pôles.*

1048. Nous avons déjà dit que la tension des pôles d'une pile peut souvent se reconnaître directement, ou en approchant l'un de l'autre deux fils métalliques très-fins, communiquant avec eux : quand ils sont assez voisins, il se dégage une petite étincelle. Dans tous les cas, on peut charger un condensateur, une bouteille de Leyde, etc. : on obtient alors des phénomènes absolument semblables à ceux qui résultent de l'accumulation de l'électricité produite par le frottement. La charge que peut acquérir le condensateur a lieu par un seul contact instantané, pour les piles ordinaires et même pour les piles sèches, à moins que le corps solide interposé entre les plaques ne soit très-mauvais conducteur : alors la charge exigerait un temps appréciable; c'est ce que M. Biot a reconnu en employant des plaques de nitre fondu. Il faut observer que, pour charger le condensateur, la communication doit être établie de la manière la plus intime entre la pile et le plateau collecteur. La disposition la plus avantageuse, d'après M. Biot, est celle de la fig. 580 : au-dessus de la pile on met un petit godet en fer plein de mercure, dans lequel plonge un fil qui communique avec le condensateur.

1049. Suivant le même physicien, la tension d'une pile dépend de la nature des métaux qui la composent, du nombre des éléments, et nullement de leur étendue et de la faculté conductrice du liquide interposé : aussi une pile à auges montée avec de l'eau pure charge le condensateur de la même manière que quand elle est montée avec une dissolution acide ou salée; mais elle ne donne aucune commotion, et ne produit aucune action chimique. M. de la Rive a été conduit par ses expériences à des résultats opposés relativement à l'influence de la faculté conductrice de la matière interposée; car, d'après ce physicien, la tension de la pile varierait en sens contraire de la conductibilité du corps qui sépare les couples.

Suivant M. Biot, la tension augmente proportionnellement au nombre des éléments; mais, d'après des expériences plus récentes de Peltier, la tension croîtrait suivant une loi plus rapide.

1050. Quand on fait communiquer les deux pôles d'une pile par un fil métallique, les tensions des pôles disparaissent. Lorsque, après avoir établi la communication entre les deux pôles d'une pile, on interrompt le circuit, la tension, au premier instant, est d'autant plus petite que le circuit est resté fermé plus longtemps, du moins jusqu'à une certaine limite de temps, 15 à 20 minutes. La diminution de tension due à l'établissement du circuit pendant un temps donné est d'autant plus considérable que le nombre des éléments est plus grand, et que le liquide est moins conducteur : le plus ou moins de conductibilité de l'arc qui établit la communication est sans influence. Le temps que les piles emploient à recouvrer leur tension primitive est d'autant plus grand que le circuit est resté fermé plus longtemps; quand on ne ferme pas le circuit, la tension paraît rester constante.

1051. Au moyen de la pile, M. Ermann a fait des observations très-curieuses sur la faculté conductrice des corps pour l'électricité sous une faible tension. Si l'on fait communiquer les pôles d'une pile isolée avec deux électroscopes à feuilles d'or, tous deux sont électrisés; si alors on prend un cylindre de savon sec, à l'une des extrémités duquel on insère un fil métallique, en mettant ce dernier en communication avec le sol et le savon en contact avec une des extrémités de la pile, l'électroscope correspondant revient à l'état naturel, et l'autre indique une plus forte tension : le savon remplit donc alors l'office de bon conducteur pour l'une et l'autre électricité. Mais, si on fait communiquer les deux pôles de la pile

par un fil métallique isolé, interrompu par le savon, les électroscopes continuent à indiquer la même tension, et par conséquent le savon agit comme mauvais conducteur. Enfin, si on touche le savon avec un corps bon conducteur, le pôle négatif seul est neutralisé : le savon ne conduit donc alors que le fluide négatif. La flamme d'alcool a présenté les mêmes phénomènes; mais sa faculté conductrice est en faveur du fluide positif : la flamme du phosphore, la gélatine, l'ivoire, ont donné les mêmes résultats. On explique, mais incomplétement, ces phénomènes en admettant dans chacun de ces corps une différence de conductibilité pour les deux fluides, qui ne devient sensible que pour les petites tensions.

1052. On a employé les piles sèches pour produire une espèce de mouvement perpétuel. Si on place deux piles sèches parallèlement sur un support conducteur, les pôles contraires en regard (fig. 581); entre les piles un support portant deux aiguilles de verre terminées par des balles de sureau *m* et *n*, les aiguilles seront successivement attirées et repoussées par les deux pôles, et prendront un mouvement oscillatoire qui durera tant que la pile conservera une tension sensible. On pourrait aussi donner à l'aiguille mobile un mouvement de rotation horizontale continu. Ces appareils marchent quelquefois pendant plusieurs années, mais les mouvements sont très-irréguliers. On en concevra facilement la raison en remarquant que les piles sèches, ayant une conductibilité très-faible, exigent un temps plus ou moins long pour acquérir le maximum de tension, et que cette tension doit nécessairement dépendre de l'état hygrométrique de l'air; aussi les piles sèches ont moins d'action en été qu'en hiver. Ces appareils finissent d'ailleurs toujours par s'arrêter après un certain temps.

1053. M. Bohnenberger a fait une heureuse application de la tension des piles sèches à la construction d'un électroscope condensateur, d'une sensibilité extrême. Cet appareil, perfectionné par M. Becquerel, est formé d'une pile sèche renfermée dans un cylindre de verre, et posée horizontalement sur un support en bois; les pôles sont garnis de deux plaques de laiton qui s'élèvent en se rapprochant, et restent parallèles dans une longueur de 8 centimètres. Une cage de verre qui enveloppe cet appareil est percée de manière à laisser passer un fil de laiton, qui suspend une lame d'or de 6 à 8 centimètres de longueur au milieu de l'intervalle des lames de cuivre, et parallèlement à leur direction; le fil de cuivre au delà de la cage est renfermé dans un tube de verre, et se ter-

mine par un bouton sur lequel on visse un condensateur. La plus faible quantité d'électricité développée dans le plateau collecteur produisant dans la feuille d'or de l'électricité libre par la séparation des plateaux, elle cesse alors d'être également attirée par les deux plaques de laiton, et se rapproche de celle dont l'électricité est contraire à celle qu'elle a reçue. La sensibilité de cet appareil est telle que, d'après M. Becquerel, dans un temps sec, un tube de verre frotté avec du drap agit sur cet instrument à une distance de plus de 3 mètres; mais les variations d'intensité qu'éprouvent les tensions des piles sèches et le décroissement de cette intensité avec le temps rendent la sensibilité de cet appareil très-variable.

1054. M. Rousseau a appliqué les piles sèches à la détermination de la faculté conductrice des différents corps. L'appareil (fig. 582) est formé d'un gâteau de résine AB, sur lequel est fixé un conducteur en cuivre CA, terminé au centre du plateau par une tige conductrice CN, qui s'effile en une pointe aiguë sur laquelle repose une aiguille faiblement aimantée DO, dont l'extrémité est garnie d'un disque de cuivre O. Le conducteur CA porte une tige de cuivre verticale mobile autour de la charnière *i*, et garnie, à la hauteur de l'aiguille, d'une boule O'; l'extrémité du conducteur CA reçoit une petite capsule métallique, destinée à contenir le liquide ou le corps dont on veut éprouver la faculté conductrice; enfin, à une certaine distance du plateau, se trouve une pile sèche communiquant par sa base avec le sol, et garnie à son sommet d'une tige métallique qui plonge dans le vase sans en toucher les parois. Le plateau est recouvert d'une cloche portant à la hauteur de l'aiguille un cercle divisé. Pour se servir de cet instrument, on enlève le fil *ab*, et on tourne la cage de manière que le disque de l'aiguille touche la boule O'; ensuite on place dans la capsule A le corps sur lequel on doit opérer, et on le fait toucher par le fil *ab* : si le corps est bon conducteur, le disque O est repoussé par la boule O', parce que tous deux sont électrisés de la même manière. M. Rousseau a ainsi reconnu que les huiles de graines conduisent bien l'électricité, que l'huile d'olive ne la conduit presque pas; mais qu'en ajoutant à cette dernière une très-petite quantité d'huile de graine, elle devient conductrice. Cet appareil présente alors un très-bon moyen pour reconnaître les huiles d'olive falsifiées; mais il ne donne pas la mesure de la quantité d'huile de graines qu'elles renferment. M. Rousseau a constaté que les charbons employés avec le

plus de succès dans la fabrication de la poudre à canon sont en général les plus mauvais conducteurs.

§ 3. *Effets mécaniques produits par les courants sur les corps qu'ils traversent.*

1055. Lorsqu'un vase est divisé en deux compartiments par une cloison verticale, faite avec une membrane de vessie ou une feuille de papier enduite d'albumine coagulée par la chaleur, et que l'on met un liquide peu conducteur à la même hauteur dans les deux compartiments, en faisant plonger le fil positif d'une pile de 80 paires dans l'un d'eux, et le fil négatif dans l'autre, en peu d'instants le liquide cesse d'être de niveau : il s'élève dans le vase où plonge le fil négatif. Cette observation a été faite par M. Porrett en 1816. On peut la vérifier d'une manière très-commode en fermant un tube par un fragment de vessie, le plongeant dans un vase ouvert renfermant un liquide quelconque conducteur, introduisant ce liquide dans le tube à la même hauteur, et faisant plonger les fils polaires dans le vase et dans le tube : après 15 ou 20 minutes, la différence de niveau peut être de plusieurs centimètres. C'est d'après ces expériences que plusieurs physiciens ont pensé que l'électricité pourrait bien être la cause des phénomènes d'endosmose (t. 1er, p. 161).

Lorsque dans un syphon renversé on met du mercure jusqu'à une hauteur de 8 à 10 centimètres, et une dissolution saline dans la branche où l'on fait plonger le fil positif, la dissolution finit bientôt par passer en totalité dans l'autre branche. Si on plonge dans de l'eau acidulée deux tubes de verre verticaux, fermés chacun à la partie inférieure par un bouchon percé d'un grand nombre de trous, et renfermant de l'argile humide (fig. 583), en faisant communiquer les tubes avec les pôles d'une pile, l'argile renfermée dans le tube positif s'écoule dans le vase.

1056. Les liquides superposés à travers lesquels on fait passer des courants éprouvent encore des mouvements d'une autre nature, qui ont été observés par MM. Ermann, Davy, Serullas, Herschell; on n'en connaît encore ni la cause ni les lois. On peut constater ces mouvements en mettant au fond d'une capsule de porcelaine du mercure et un peu d'eau acidulée; en faisant communiquer avec l'eau et avec le mercure les fils polaires d'une pile, les liquides

éprouvent des mouvements qui varient avec la nature du pôle qui les touche : quand le mercure est en contact avec le pôle positif, sa surface se ternit rapidement, et elle devient brillante quand on établit sa communication avec l'autre pôle.

§ 4. *Actions des courants les uns sur les autres et sur les aimants.*

1057. En 1819, M. Œrsted découvrit ce fait important : un conducteur traversé par un courant électrique agit sur l'aiguille aimantée, et y produit une déviation qui dépend du sens du courant et de la position du conducteur relativement à l'aiguille. Cette découverte ouvrit une nouvelle carrière aux recherches physiques : MM. Biot et Savart déterminèrent les lois de ces effets; Ampère découvrit l'action des conducteurs les uns sur les autres, l'action de la terre sur les conducteurs mobiles, et parvint à établir une théorie qui lie ces deux ordres de phénomènes entre eux et avec ceux que présente le magnétisme.

Dans un ouvrage élémentaire, il serait impossible de suivre l'ordre chronologique des découvertes; cette méthode n'aurait point d'ailleurs l'avantage de montrer la liaison des faits. Nous les décrirons en suivant l'ordre de dépendance établi par Ampère; mais auparavant il est nécessaire de définir ce que nous entendons par la direction du courant.

1058. Lorsque les deux extrémités d'une pile sont en contact par un fil conducteur (fig. 584 et 585), les électricités développées aux pôles de la pile s'écoulent par le conducteur. On ne sait pas si le transport de l'électricité a lieu par une suite de décompositions et de recompositions successives dans chaque molécule, comme lorsque l'électricité à haute tension parcourt une série de petits corps conducteurs très-voisins, ou si le conducteur est parcouru seulement par un seul fluide, celui qui éprouve le moins de résistance. Quoi qu'il en soit, on donne le nom de courant à cette disposition particulière de l'électricité dans le fil conducteur, et on désigne par direction du courant celle de l'électricité positive. Pour reconnaître le sens du courant, il faut se souvenir que l'élément efficace est formé de deux plaques, l'une de zinc, l'autre de cuivre, séparées par un liquide, et que le zinc prend au liquide l'électricité négative. Ainsi dans la pile, le courant marche du zinc au cuivre à travers le liquide, et dans le conducteur le courant est la

suite de celui qui parcourt la pile. Lorsque les piles sont formées de disques soudés comme dans les piles en colonne et à auges, le cuivre qui se trouve à l'une des extrémités ne sert que de conducteur, et il forme le pôle négatif; à l'autre extrémité se trouve une plaque de zinc qui forme un couple avec la lame conductrice, et c'est là que se trouve le pôle positif. Dans les piles de Wollaston (fig. 585), le pôle zinc est le pôle négatif, parce que le conducteur est en communication directe avec la dernière plaque zinc.

Actions des courants les uns sur les autres.

Nous commencerons par exposer les principaux résultats de l'expérience, en décrivant les procédés qui ont été employés pour les vérifier; ensuite nous examinerons les différentes conséquences qui en résultent.

1059. *Les parties consécutives d'un même courant exercent entre elles une action répulsive.* Ainsi (fig. 587), *mn* et *m'n'* étant des portions voisines d'un même courant, si le conducteur MN était tellement disposé que les parties *mn* et *m'n'* pussent se séparer sans que le courant cessât de les traverser, ces deux parties tendraient à s'éloigner l'une de l'autre.

Pour démontrer ce fait par expérience, on prend un vase plat ABCD (fig. 588) en verre ou en porcelaine, que l'on sépare en deux parties dans toute sa longueur par une cloison de verre fixée avec du mastic. On verse du mercure dans les deux moitiés du vase, et on place sur le mercure le conducteur *abcde* (fig. 589), de manière que les deux branches parallèles *ab* et *ed* soient parallèles à la cloison, et que l'arc vertical passe par-dessus cette même cloison. Le fil conducteur est recouvert de soie, afin que le courant ait lieu dans toute la longueur des branches horizontales. On plonge alors dans le mercure, et sur le prolongement des fils *ab* et *ed*, deux fils épais communiquant avec les extrémités d'une pile : le courant électrique suit la direction *ab*, il monte par l'arc *bcd*, revient par le fil *de*; au moment de l'immersion, le conducteur s'éloigne parallèlement à lui-même, jusqu'à ce qu'il soit arrêté sur les bords opposés du vase.

1060. *Deux courants parallèles s'attirent s'ils sont dirigés dans le même sens, et se repoussent s'ils sont dirigés en sens contraire* (fig. 590, 591). On emploie pour constater cette action l'appareil (fig. 592), formé de deux vases annulaires placés au-dessus l'un

de l'autre; dans l'axe de l'appareil se trouve une tige de cuivre *xy*, terminée supérieurement par une petite capsule, dans laquelle repose la pointe d'une tige de verre *ab;* à une de ses extrémités de cette tige est enroulé un fil de cuivre, dont les bouts plongent dans l'eau acidulée des deux vases annulaires MN et PQ, et l'autre porte un contre-poids; deux lames de cuivre *vv'*, soudées à la tige *xy*, plongent dans l'eau acidulée du vase MN : en mettant la tige *xy* en communication avec le pôle positif d'une pile, et le vase PQ en contact avec l'autre, le courant traverse l'eau acidulée du vase MN, suit le conducteur vertical et traverse l'eau acidulée du vase inférieur; si alors on approche un conducteur vertical fixe, le courant vertical mobile est porté en avant ou en arrière, suivant le sens des courants. On peut aussi employer d'autres appareils, dont nous parlerons plus loin.

1061. *Les courants angulaires s'attirent quand ils vont tous deux en s'approchant ou en s'éloignant du sommet de l'angle, et ils se repoussent quand l'un s'approche et que l'autre s'éloigne du sommet de l'angle.* Ainsi, dans la fig. 593, il y a attraction, et dans la fig. 594 il y a répulsion. Il résulte de là que quand deux courants indéfinis AB et CD (fig. 595) se coupent au point O, il y a attraction dans deux angles opposés par leur sommet, et répulsion dans les deux autres : par conséquent, si l'un des courants ou tous deux sont mobiles autour d'un axe vertical passant par le point O, ils se placeront parallèlement, de manière que les courants soient dirigés dans le même sens. Pour que ces actions se manifestent, il n'est point nécessaire que les courants soient dans un même plan : ils peuvent être disposés d'une manière quelconque dans l'espace; mais alors il faut prendre leur perpendiculaire commune pour le sommet de l'angle.

Pour constater ce fait par l'expérience, la disposition la plus simple est celle représentée fig. 596. AB et CD sont deux vases annulaires concentriques renfermant de l'eau acidulée; au centre s'élève une tige *ab*, terminée par une petite capsule dans laquelle repose une pointe soudée au conducteur horizontal MN, dont les deux extrémités recourbées plongent chacune dans le liquide acidulé d'un des vases annulaires : en mettant un de ces vases en contact avec le pôle positif d'une pile, l'autre en communication avec l'autre pôle, et en approchant de MN un fil de cuivre PQ communiquant avec les pôles de la même pile ou d'une pile différente, le courant mobile se dirige parallèlement au courant fixe et

de manière que l'électricité le parcourt dans le même sens. On peut encore vérifier le fait dont il s'agit par d'autres dispositions que nous décrirons plus loin.

1062. *Un courant quelconque exerce sur un autre la même action qu'un conducteur sinueux qui s'écarte très-peu de la direction du premier.*

On peut vérifier ce fait en prenant un fil de cuivre recouvert de soie dans toute son étendue, disposé en ligne droite sur une certaine longueur, et que l'on fait revenir en sens contraire en faisant un grand nombre de sinuosités autour de sa première direction (fig. 597) : en mettant les deux extrémités *a* et *b* du fil en communication avec les extrémités d'une pile et en le plaçant parallèlement au conducteur mobile de l'appareil (fig. 592), ce dernier n'éprouve aucune déviation : par conséquent la partie sinueuse du courant fixe, qui agit en sens contraire de la partie rectiligne, exerce une action égale. Il suit de là que l'on peut remplacer une portion quelconque de courant *mn* (fig. 598) par les deux petits courants *mx* et *nx*, ou par un nombre quelconque de petits courants *mx*, *xy*, *yz*, *zn* (fig. 599), formant un polygone dont *mn* est un des côtés et ayant la même intensité : cette substitution de plusieurs petits courants à un seul est analogue à la décomposition des forces en statique.

A l'aide de ces faits, nous pouvons déterminer la nature des actions produites par des courants indéfinis ou circulaires qui agissent sur des courants finis disposés de différentes manières.

1063. *Action d'un courant indéfini sur un courant fini mobile autour d'un axe perpendiculaire à sa direction.* Soit OA (fig. 600) le courant fini, mobile dans un plan autour du point O. Il peut arriver trois cas : le courant indéfini peut couper l'axe de rotation, être situé au delà du cercle décrit par l'extrémité A du courant, ou être placé à une distance plus petite que OA. Dans le premier cas, nous savons déjà que le courant OA se dirigera parallèlement au courant indéfini, de manière que le mouvement de l'électricité ait lieu dans le même sens.

Dans le second cas, soit MN (fig. 601) le courant indéfini : dans la position OA du courant mobile, il est attiré par le courant MN, il prendra alors la position OA'; dans cette nouvelle position, ce courant est repoussé par la portion du courant indéfini *n*N, puisque l'un va en s'approchant et l'autre en s'éloignant du sommet *n* de l'angle formé par leurs directions, et il sera attiré par la partie

*n*M du courant indéfini, puisque dans l'angle O*n*M les courants vont tous deux en s'approchant du sommet de l'angle : ainsi ces deux forces concourront à faire marcher le courant dans le même sens. Il est facile de voir, par le même raisonnement, que le courant prendra successivement les positions OA″, OA‴..., OA⁷⁷⁷, et qu'il aura un mouvement continu de rotation. Si le courant fini, au lieu d'être dirigé du centre à la circonférence, était dirigé en sens contraire (fig. 602), le mouvement de rotation aurait encore lieu, mais le sens du mouvement serait opposé; et il serait le même si le sens du courant indéfini était changé en même temps. Nous conclurons de là que, quand un courant fini, mobile dans un plan autour d'une de ses extrémités, est soumis à l'action d'un courant indéfini placé à une distance de l'axe de rotation plus grande que la longueur du courant mobile, ce dernier prend un mouvement continu de révolution en sens contraire du mouvement de l'électricité dans le courant indéfini quand l'électricité dans le courant fini se meut du centre à la circonférence, et dans le même sens quand il va de la circonférence au centre.

Ce mouvement sera uniforme, si le courant MN est très-éloigné; mais, s'il est très-voisin du courant mobile, il est évident que la vitesse du mouvement variera avec la position du courant mobile relativement au courant indéfini.

Enfin, dans le troisième cas (fig. 603), lorsque le courant est placé entre le centre et la circonférence, soit MN la direction du courant indéfini fixe, dont la projection horizontale coupe le conducteur mobile au point B, il y aura répulsion dans l'angle OBN, et attraction dans l'angle MBO : la résultante de ces deux forces tendra à faire mouvoir le conducteur mobile dans la direction A*a*; mais, d'un autre côté, l'attraction de l'angle ABN et la répulsion de l'angle ABM auront pour résultante une force qui tendra à faire tourner le courant OA en sens contraire, et qui aura sur la première force l'avantage d'agir par un plus grand bras du levier. Lorsque les moments de ces forces seront égaux, OA se trouvera en équilibre. Ainsi, en approchant lentement du centre un conducteur horizontal MN, placé d'abord un peu au delà de OA, le mouvement de rotation continu du conducteur mobile cessera pour faire place à une position d'équilibre, dans laquelle il sera d'autant plus rapproché du diamètre, parallèle au conducteur fixe, que celui-ci sera plus près du centre. Dans ce qui précède, nous avons supposé les courants dans le même plan; mais les effets seraient les

mêmes, à l'intensité près, si le courant indéfini était au-dessus ou au-dessous du plan que peut parcourir le courant fini.

Si le courant fini était mobile autour de son milieu (fig. 604), le mouvement de rotation n'aurait plus lieu, parce que chaque moitié tendrait à tourner en sens contraire. Il prendrait une position d'équilibre stable dans laquelle il serait parallèle au courant indéfini, et le mouvement de l'électricité dans le même sens. L'équilibre pourrait aussi exister dans la position indiquée par la fig. 604 A, mais il serait instable.

Pour constater ces faits, on se sert d'un vase ABCD (fig. 605), dont le centre est garni d'une douille ouverte par les deux bouts; on place dans cette douille une tige métallique terminée par une petite capsule *s*, et on y suspend le conducteur figure 606; on remplit le vase d'eau acidulée dans laquelle plonge l'anneau *abc* qui termine le conducteur, et on fait communiquer la tige *xy* avec une des extrémités de la pile et le vase avec l'autre; en supposant que la tige *xy* communique avec le pôle positif, le courant est disposé dans le conducteur mobile comme l'indiquent les flèches. Le conducteur mobile, soumis à l'action d'un courant fixe placé à une petite distance, tourne d'une manière continue dans le sens du courant extérieur si le courant dans le conducteur mobile va de la circonférence au centre, et en sens contraire si le courant est dirigé du centre à la circonférence. La terre, comme nous le verrons plus tard, agit de la même manière que si elle était parcourue par un courant dirigé de l'est à l'ouest, et principalement accumulé vers l'équateur. Alors ce courant terrestre tend à faire tourner le courant mobile; mais on reconnaîtra que le mouvement est dû au courant rectiligne, quand, en y changeant le mouvement de l'électricité, le sens du mouvement change également.

1064. *Action d'un conducteur circulaire sur un courant fini, situé dans le même plan ou dans un plan parallèle peu éloigné, et dont l'extrémité fixe est dans l'axe du conducteur circulaire.* Soit MNPQ (fig. 607) le courant circulaire fixe, dont le rayon est plus grand que la longueur du conducteur mobile; les parties du circuit circulaire voisines de l'extrémité du courant mobile exerçant une action plus grande que les parties opposées, il est facile de voir que le conducteur mobile se mouvra d'une manière continue autour du point O, et en sens contraire du mouvement de l'électricité dans le conducteur circulaire quand le courant mobile ira du

centre à la circonférence ; et dans le sens du mouvement du courant circulaire, quand le courant mobile sera dirigé de la circonférence au centre. Si le centre du courant circulaire ne coïncidait pas avec le point autour duquel le courant mobile peut tourner, le mouvement de rotation pourrait encore exister ; mais alors il cesserait d'être uniforme. Il pourrait aussi arriver que le courant mobile prît une position fixe d'équilibre : cela arrivera quand le cercle décrit par l'extrémité A du conducteur mobile coupera le courant circulaire.

Si le courant fini était mobile autour de son milieu, situé sur l'axe du courant circulaire (fig. 608), chaque moitié tendrait à tourner en sens contraire avec la même force ; par conséquent, le courant serait en équilibre dans toutes les positions.

Si, dans le premier cas, le courant rectiligne était fixe et le courant circulaire mobile autour de son centre, il prendrait un mouvement contraire, c'est-à-dire qu'il marcherait dans le sens de l'électricité si le courant fini allait du centre à la circonférence, et en sens contraire si l'électricité allait de la circonférence au centre. Si le courant rectiligne était extérieur au courant circulaire (fig. 609), le courant circulaire se mouvrait dans un sens opposé au mouvement produit par un courant intérieur ; et si c'était le courant rectiligne qui fût mobile, son mouvement serait contraire à ce qu'il serait s'il était intérieur au cercle.

Pour vérifier ces faits, on emploie le vase annulaire fig. 605 et le conducteur mobile fig. 606, et on environne le vase du conducteur spiral fig. 610 : la rotation se fait dans le même sens qu'avec un courant rectiligne indéfini ; mais il est uniforme. Dans cette expérience, les parties verticales du conducteur mobile concourent avec les parties horizontales pour produire la rotation ; mais, en les faisant très-courtes, on peut rendre leur influence insensible. La terre agit encore comme dans les expériences précédentes pour produire la rotation ; mais on constate que l'effet est dû au courant circulaire, lorsqu'en changeant le sens du courant dans le conducteur circulaire, la direction du mouvement de rotation est également changée.

Pour constater la rotation des courants circulaires par les courants rectilignes, on suspend dans la coupe *s* (fig. 605) le conducteur fig. 611, composé d'un fil de cuivre plié en spirale, dont les spires sont maintenues dans un même plan par trois petites règles de fanon de baleine ; l'extrémité intérieure de la dernière

spire se recourbe verticalement, et sert à suspendre le conducteur. Le courant arrivant par *s*, par exemple, suit les contours de la spirale, d'où il sort par tous les points pour atteindre les parois du vase; et ce sont alors les courants qui traversent l'eau qui agissent sur la spirale : on voit cette dernière se mouvoir dans le sens *abc*, c'est-à-dire en rétrogradant. Si on fait arriver le courant par les parois du vase, il parvient à la spirale par l'eau acidulée en se rapprochant du conducteur, et la spirale se meut dans le sens du courant, et, par conséquent, le sens du mouvement est encore le même que précédemment. C'est d'ailleurs ce qu'il était facile de prévoir, parce que le sens du courant est changé à la fois dans les deux conducteurs. Pour changer la direction du mouvement, il faut substituer à la spirale fig. 611 la spirale fig. 612, dans laquelle le fil est plié en sens contraire.

Savary a disposé l'appareil d'une manière différente. Les figures 613 et 614 représentent deux petits conducteurs mobiles, semblables à celui de la fig. 606, mais qui en diffèrent en ce qu'une des deux tiges verticales *h* est formée d'une manière isolante, et que la couronne *abcd* est interrompue à droite ou à gauche du conducteur vertical par une petite lame d'ivoire : quand on place l'un de ces conducteurs mobiles dans la coupe *s* de la fig. 605, de manière que l'anneau plonge dans l'eau acidulée, le conducteur mobile tourne d'un mouvement continu qui a lieu dans le même sens, soit que le courant monte ou descende dans le conducteur vertical. Ce mouvement provient, comme dans les expériences précédentes, des courants qui traversent l'eau acidulée pour se rendre dans la paroi du vase : en effet, quand le courant descend par *xy* (fig. 613), il parcourt le cercle dans la direction *abcd* et sort par chacun de ses points. Si nous désignons par *zt* un de ces courants, il tend à faire tourner le cercle dans le sens *cba*, puisqu'il s'en éloigne; mais si le courant venait de l'eau acidulée, le courant dans le cercle aurait lieu dans le sens *dcba* : alors le cercle devrait se mouvoir dans le sens du courant dans ce conducteur, c'est-à-dire dans le sens *cbad*, qui est le même que précédemment. Mais le sens du courant serait changé si on employait le conducteur mobile fig. 614.

1065. *Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant fini perpendiculaire à sa direction.* Soit AB (fig. 615) un courant vertical fini, placé au-dessus et derrière un conducteur indéfini MN : je dis que le conducteur vertical ne peut se mouvoir que parallèlement à lui-même et dans un plan parallèle à MN. En effet,

soit BP la plus courte distance des deux courants; en supposant que les courants soient dirigés comme l'indiquent les flèches, l'action de la partie MP sera répulsive, et celle de la partie PN sera attractive; si on prend deux points *m* et *n* également éloignés de P, leurs actions sur un point *a* de AB pourront être représentées par les lignes *ax* et *ay*, et comme ces forces sont égales, leur résultante *az* sera parallèle à MN. Il est facile de voir que, si le courant était ascendant dans AB (fig. 616), le mouvement se ferait toujours parallèlement à MN; mais il aurait lieu en sens contraire. Cet effet est dû à ce que le conducteur AB n'est pas prolongé au delà du point B : car la partie qui serait située au-dessous aurait un mouvement contraire, et le courant tournerait autour du point B.

On peut énoncer ces deux faits de la manière suivante : un courant fini qui s'approche d'un courant indéfini tend à marcher en sens inverse de ce dernier; un courant fini qui s'éloigne d'un courant indéfini tend à marcher dans le sens de ce dernier.

Réciproquement, un conducteur mobile indéfini, soumis à l'action d'un conducteur fini fixe, marche dans le sens de l'électricité lorsque le courant va en s'approchant du conducteur indéfini, et en sens contraire lorsque le courant fini va en s'en éloignant.

Il résulte de là que, si un conducteur fini vertical AB (fig. 616 A), mobile autour d'un axe vertical OO', est soumis à l'action d'un courant horizontal indéfini MN, situé au-dessous dans un plan passant par l'axe OO' ou en avant de cet axe, le plan AB OO' se dirigera parallèlement à MN, de manière que AB soit en avant de OO' si le courant tend à l'éloigner de MN, et en arrière (fig. 617) si le courant se meut vers MN. Si deux courants AB et A'B' (fig. 618), mobiles autour de la droite OO', étaient dirigés en sens contraire, le plan ABA'B' se dirigerait parallèlement à MN, et les actions exercées par le courant MN sur les deux courants finis concourraient à produire cet effet. Enfin, si les deux courants AB et A'B' (fig. 619 et 620), toujours mobiles autour de OO', étaient dirigés dans le même sens, les deux courants finis seraient sollicités en sens contraire par le courant MN, et le plan ABA'B' resterait en équilibre dans toutes les positions possibles, si le courant MN était assez éloigné pour que les distances de ce courant aux points B et B' fussent sensiblement égales dans toutes les positions possibles du plan ABA'B', ou s'il passait par un point de la ligne OO'. Si le courant MN est à côté de l'axe et à une distance finie, le plan ABA'B' se dirigera parallèlement à MN, mais l'équilibre ne sera stable que dans

une seule direction d'un très-petit mouvement imprimé. Si MN coupait le cercle que décrit le point B, le plan ABA'B' prendrait une direction plus ou moins inclinée à MN.

On peut facilement vérifier ces faits au moyen de l'appareil (fig. 592), en plaçant au-dessous du réservoir annulaire PQ un courant horizontal; le courant vertical se dirige comme la théorie l'indique.

1066. *Action d'un courant circulaire sur un courant fini perpendiculaire à son plan.* Si un courant AB (fig. 621) fini, vertical, et mobile autour de l'axe vertical OO', est soumis à l'action d'un courant circulaire MNPQ, le courant vertical prendra un mouvement de rotation autour de OO', en sens contraire du mouvement de l'électricité dans le courant circulaire si les deux courants tendent à s'approcher, et dans le même sens s'ils tendent à s'éloigner. Lorsque deux courants verticaux AB, A'B' (fig. 622) seront dirigés dans le même sens autour d'un axe vertical, les mouvements auront lieu de la même manière, et les actions exercées par le courant circulaire sur les deux courants verticaux concourront à produire cet effet; mais si les deux courants (fig. 623) étaient dirigés en sens contraire, les actions exercées par le courant circulaire sur les deux courants verticaux se détruiraient, et le plan ABA'B' resterait en équilibre dans toutes les positions possibles.

1067. *Action d'un courant indéfini horizontal sur un système de courants horizontaux et verticaux.* Considérons maintenant un système de courants horizontaux et verticaux (fig. 624 et 625), dans lequel les deux portions de courants horizontaux sont dirigées en sens contraire, et les courants verticaux dirigés dans le même sens, soumis à l'action d'un courant indéfini placé latéralement. Il est évident, d'après ce qui précède, que, si le courant indéfini est à une très-grande distance, les actions sur les courants verticaux se détruiront, et il ne restera que l'action sur les courants horizontaux, action qui, comme nous l'avons vu, tend à faire tourner le conducteur avec un mouvement continu.

Si les courants verticaux marchaient en sens contraire, les courants horizontaux dans le même sens (fig. 626 et 627), le courant indéfini passant par l'axe *oo'* ou à une distance plus grande que *Bo*, son action tendrait à donner aux courants mobiles une position fixe d'équilibre; elle pourrait être la même pour les courants horizontaux et verticaux, et elle pourrait être différente : dans les fig. 626 et 627 elle est évidemment différente. S'il existait des courants ho-

rizontaux en sens contraire (fig. 628 et 629), disposés de telle sorte que les deux courants horizontaux et les deux courants verticaux fussent opposés, l'action du courant indéfini, en le supposant à une très-grande distance, ne se manifesterait que sur les courants verticaux. S'il existait quatre courants horizontaux opposés (fig. 630 et 631), et deux courants verticaux dirigés dans le même sens, le système des courants serait complétement astatique, c'est-à-dire resterait en équilibre dans toutes les positions possibles : le même effet aurait lieu par la disposition indiquée fig. 632. Et, comme chaque élément curviligne de courants peut être remplacé par deux éléments rectilignes perpendiculaires entre eux, on voit qu'un courant circulaire (fig. 633) mobile autour de l'axe OO', soumis à l'action d'un courant indéfini placé à une grande distance, se dirigerait parallèlement au courant indéfini, de manière que la branche ascendante serait en avant du courant, comme les systèmes de courants fig. 628 et 629, et que les systèmes de courants fig. 634 et 635 seraient également astatiques.

Pour soumettre des circuits complets à l'action des courants de différentes natures, on emploie l'appareil suivant. LL' (fig. 636) représente une table en bois, que l'on rend horizontale au moyen des quatre vis *v, v, v, v;* AB et EF sont deux colonnes en cuivre qui se recourbent horizontalement. Les parties CD et FG sont séparées par une lame d'ivoire, qui conduit assez mal l'électricité pour que le courant ne puisse pas passer de l'une à l'autre; elles se terminent par les deux coupes en cuivre x et y, dont les axes sont placés dans la même verticale; au fond des capsules sont mastiqués de petits godets en verre. R et R' sont deux rainures pratiquées dans le plateau; elles sont remplies de mercure, et reçoivent les deux fils qui communiquent avec les extrémités de la pile; nous supposerons que le pôle positif communique avec R; m, m', n et n' sont quatre cavités creusées dans le plateau et également pleines de mercure; les cavités m et n communiquent, la première avec la tige AB, et la seconde avec la tige DE; de plus, les cavités m, n' et m', n communiquent entre elles par des lames de cuivre couchées sur la table; à leur point de croisement, elles sont séparées par une matière non conductrice. D'après cette disposition, si on fait communiquer m' avec R et n' avec R', le courant montera par EF et descendra par AB, en supposant que les coupes xy soient réunies par un conducteur; mais si on fait communiquer m avec R et n avec R', le courant montera par AB et descendra par EF :

ainsi le conducteur mobile, dont les extrémités reposent dans les coupes x et y, sera parcouru en sens contraire dans ces deux circonstances. Pour effectuer les communications dont nous venons de parler, on pourrait employer des fils de cuivre recourbés, que l'on placerait convenablement; mais on se sert pour cet effet d'une bascule représentée fig. 637. Elle est mobile autour d'un axe ss'; aux deux extrémités se trouvent deux petites plaques en cuivre, fixées à l'axe, et terminées par des appendices destinés à être plongés simultanément dans les cavités Rm, nR', ou $R'm'$, $R'n'$. On voit, d'après cette disposition, qu'en inclinant la bascule à droite le courant monte par EF, et qu'en l'inclinant à gauche il monte par AB.

On suspend dans les coupes x et y (fig. 636) les extrémités d'un conducteur formé d'un seul fil de cuivre recourbé de différentes manières suivant l'effet qu'on veut obtenir, et on place au-dessous le conducteur fig. 638, formé d'une seule lame de cuivre recouverte de soie, faisant plusieurs tours sur un cadre en bois. On peut faire passer le même courant d'abord par le conducteur fixe, et ensuite par le conducteur mobile; ou bien, on peut le faire passer en même temps par les deux conducteurs. Dans le premier cas, la disposition serait un peu compliquée; dans le second, il suffit de faire plonger les extrémités t et u du fil conducteur fig. 638 dans les réservoirs R et R'. La première disposition n'est nécessaire que quand les courants qui traversent les conducteurs fixes et les conducteurs mobiles, doivent avoir la même intensité; en général, il est plus commode d'employer la seconde. Le conducteur fixe est replié plusieurs fois sur lui-même, afin que son action soit augmentée; les lames sont séparées les unes des autres par de la soie, afin que le courant parcoure successivement toute la longueur du circuit.

Si on place dans les godets x et y les extrémités du conducteur fig. 639, on trouve qu'il reste en équilibre stable dans toutes les positions possibles, le conducteur mobile fig. 640 se dirige par les actions exercées sur le courant inférieur nq et sur les courants verticaux mn et pq. Ce dernier deviendrait astatique comme le premier, si le courant était situé à une distance assez grande pour que les actions exercées sur les courants horizontaux fussent sensiblement égales.

1068. *Action d'un courant circulaire sur un système de courants horizontaux et verticaux.* Considérons maintenant un système de

courants horizontaux et verticaux mobiles autour d'un axe vertical OO', soumis à l'influence d'un courant circulaire placé dans un plan horizontal (fig. 641) : si les courants sont disposés comme l'indiquent les flèches, leur système prendra un mouvement de rotation continu en sens contraire du courant circulaire, et l'action du courant circulaire sur tous les courants mobiles tendra à produire le même effet; mais si les deux courants verticaux étaient en sens contraire, le mouvement de rotation ne serait produit que par les courants horizontaux; et enfin, si dans chacun des courants horizontaux les deux parties étaient dans le même sens et les courants verticaux en sens contraire (fig. 641 A), l'appareil serait astatique.

Supposons, en dernier lieu, un système de courants formant un circuit recourbé deux fois à angle droit et terminé à l'axe *oo'* (fig. 642) : les courants horizontaux tendent à prendre des mouvements de rotation contraires, et, comme le courant inférieur est plus voisin du courant circulaire, l'action de ce dernier l'emportera; mais, d'un autre côté, l'action exercée sur le courant vertical tend à produire un mouvement de rotation en sens contraire de celui du courant horizontal inférieur : par conséquent, on ne peut pas, à l'aide des considérations qui précèdent, déterminer la nature de l'effet qui sera produit. Mais l'expérience démontre que l'action est nulle et que le système des courants reste en équilibre dans toutes les positions possibles, et que cet équilibre a également lieu, quelles que soient la courbure et les sinuosités du courant, pourvu que ses deux extrémités soient dans l'axe de rotation. Si la courbe était fermée, le courant MNPQ, étant sans action sur chaque moitié, serait également sans action sur leur ensemble. Ainsi nous pourrons établir en principe qu'un courant circulaire n'exerce aucune action sur un courant fini dont les deux extrémités sont dans un axe perpendiculaire au plan du courant circulaire et passent par son centre (fig. 643), ou sur un courant fermé qui passe par cet axe; et, comme l'action est toujours égale à la réaction, il en résulte aussi qu'un circuit fermé, d'une forme quelconque et fixe, est sans action pour faire tourner un cercle autour de son axe, lorsque cet axe coupe le circuit fixe en deux points.

On peut vérifier ces derniers faits en suspendant dans les coupes *x* et *y* (fig. 636) les conducteurs mobiles fig. 639, 640 et 644, et plaçant autour le conducteur en spirale fig. 610 : tous restent parfaitement immobiles dans une position quelconque.

1069. *Détermination de l'action de deux éléments de courants.* Les actions que les courants exercent les uns sur les autres résultent nécessairement de celles de leurs éléments. Les actions des courants étant toujours attractives ou répulsives, il doit en être de même de celles des éléments, et ces dernières doivent être dirigées suivant les droites qui joignent leurs milieux : alors, en désignant par i et i' les intensités des courants auxquels appartiennent les éléments, par ds, ds' leurs longueurs, par φ l'angle formé par le second avec le plan qui contient le premier et la droite qui joint leurs milieux, et par θ et θ' les angles qu'ils forment avec cette droite, l'action des deux éléments sera proportionnelle aux produits des intensités des deux courants, aux produits de la longueur des éléments, à une fonction inconnue des angles θ, θ' et φ, et en raison inverse d'une certaine puissance n de la distance : ainsi elle sera représentée par

$$\frac{ii'dsds'}{r^n} f(\theta, \theta', \varphi).$$

La nature de la fonction f peut facilement être déterminée par les faits que nous avons rapportés. Il résulte d'abord de ces faits, que l'action d'un élément de courant sur un autre élément placé d'une manière quelconque dans un plan élevé perpendiculairement à la direction du premier et par son milieu, est nulle. En effet, si on suppose que le premier élément se meuve dans sa direction, l'action changera de signe, quand il passera d'un côté à l'autre du plan : par conséquent l'action devra être nulle, quand son milieu sera dans le plan. Cela posé, considérons deux éléments mm', nn' (fig. 645), dont les milieux sont en a et b; nous pouvons remplacer chacun des éléments par ses projections sur la ligne ab et dans une direction perpendiculaire : les longueurs des deux premières projections sont évidemment $ds \cos\theta$ et $ds' \cos\theta'$, et celles des deux dernières sont $ds \sin\theta$ et $ds' \sin\theta'$. D'après ce qui précède, les actions de la première composante sur la quatrième, ainsi que celles de la deuxième sur la troisième, étant nulles, il ne reste que celles des composantes qui sont dirigées suivant ab et perpendiculairement à cette direction. L'action des deux premières est $dsds' \cos\theta \cos\theta'$; cherchons celle des deux dernières. Pour cela projetons l'élément $ds \sin\theta$ dans le plan qui passe par l'élément mm' et par ab; la longueur de cet élément projeté sera $ds' \sin\theta' \cos\varphi$, et son action sur l'élément $ds \sin\theta$ sera

$$dsds' \sin\theta \sin\theta' \cos\varphi.$$

Nous n'avons point à considérer l'action de l'autre composante, parce qu'elle est nulle. Il semble maintenant que pour obtenir l'action totale des deux éléments mm' et nn', il suffit d'ajouter les deux actions que nous venons d'obtenir; mais il faut remarquer que nous ne savons pas si des éléments de même longueur placés dans la même direction, ou perpendiculairement à la ligne qui joint leurs milieux et dans le même plan, sont égaux. Alors, en représentant par k le rapport de l'intensité de l'action dans le premier cas et dans le second, l'action des deux éléments sera

$$\frac{ii'dsds'}{r^n} (\sin\theta \sin\theta' \cos\varphi + k \cos\theta' \cos\theta'),$$

expression qui renferme deux inconnues, k et n. Ampère les a déterminées en cherchant par expérience la forme et la disposition de deux courants qui restent en équilibre par leur influence mutuelle, calculant d'après la formule leur action, et établissant l'identité entre le résultat du calcul et de l'observation : il en est résulté des équations de conditions renfermant n et k, et qui ont servi à les déterminer. Le premier cas d'équilibre dont Ampère s'est servi est celui d'un circuit fermé circulaire, et d'un circuit de forme quelconque dont les deux extrémités se terminent à la droite élevée par le centre du premier courant et perpendiculairement à son plan : ce cas d'équilibre fournit la relation $n + 2k - 1 = 0$. Le second cas d'équilibre employé par Ampère pour obtenir une autre relation entre n et k est celui-ci : supposons que CD (fig. 646) soit un axe mobile sur lui-même, et auquel sont fixés deux courants rectangulaires inclinés entre eux, $abcd$ et $a'b'c'd'$. Si on place entre les deux parties bc et $b'c'$ un courant fixe, en supposant que le sens du mouvement de l'électricité soit celui indiqué par les flèches, il y aura répulsion entre les courants bc et AB, $b'c'$ et AB; et les actions des courants horizontaux d'un même rectangle sur AB étant égales et de signes contraires, elles se détruiront : or il résulte de l'expérience que, dans la position d'équilibre, les distances des courants verticaux mobiles au courant vertical fixe sont en raison inverse de leur longueur; et, comme on trouve par le calcul que, pour que cette relation existe, il faut que $n = 2$, l'équation précédente donne

$$k = -\frac{1}{2},$$

l'expression de l'action de deux éléments de courant devient alors

$$\frac{ii'dsds'}{r^2}\left(\sin\theta \sin\theta' \cos\varphi - \frac{1}{2}\cos\theta \cos\theta'\right).$$

Il faut bien remarquer que les angles θ et θ' doivent être comptés d'un même côté de la ligne ab, et d'un même côté des éléments par rapport à l'origine des courants. Au moyen de cette formule on pourra facilement, et dans tous les cas, déterminer la nature, la direction et l'intensité de l'action de deux courants donnés de forme et de position, en cherchant la résultante des actions de tous les éléments qui les constituent; du moins on ne rencontrera dans la solution de ces questions que les difficultés inhérentes à l'analyse; dans un grand nombre de cas, l'intensité de l'action pourra être déterminée exactement, et dans tous les autres on obtiendra des valeurs aussi approchées qu'on le désirera.

En partant de la formule de l'action de deux éléments de courants, Ampère a découvert les faits suivants.

1070. L'action d'un conducteur rectiligne indéfini ou d'un courant circulaire sur un élément de courant situé d'une manière quelconque dans l'espace est perpendiculaire à ce petit courant.

Un courant circulaire NMPQ (fig. 647) n'exerce aucune action sur un courant circulaire ou une portion quelconque de courant

circulaire dont le plan est parallèle à celui du courant fermé NMPQ, et dont le centre se trouve sur la ligne *oo'* perpendiculaire au plan du cercle NMPQ et passant par son centre. Ce fait peut être facilement constaté en suspendant dans les coupes de l'appareil fig. 636 le conducteur mobile fig. 648, et plaçant autour la spirale fig. 610.

Lorsqu'un courant qui suit une courbe plane quelconque est soumis à l'action d'un courant indéfini dans les deux sens, et se meut autour d'un axe perpendiculaire au plan de la courbe et à la direction du courant indéfini, le moment des forces est le même dans toutes les positions.

Un courant formant un circuit fermé fixe ne peut jamais imprimer à un autre courant fermé un mouvement de rotation continu constamment dirigé dans le même sens.

1071. *Action des solénoïdes.* Ampère a désigné sous le nom de *solénoïde* un système de petits courants circulaires égaux, parcourus dans le même sens par l'électricité, dont les centres sont placés sur une courbe quelconque, et les plans perpendiculaires à cette courbe.

L'action d'un solénoïde d'un très-petit diamètre sur un élément de courant se réduit à deux forces appliquées à l'élément, perpendiculaires à deux plans qui passent par cet élément et par chacune des extrémités du solénoïde. Chacune des forces est en raison inverse du carré de la distance à l'extrémité du solénoïde, et proportionnelle au sinus de l'angle que la droite joignant l'élément avec cette extrémité du solénoïde fait avec la direction de l'élément. Il suit de là que l'action d'un solénoïde sur un élément de courant ne dépend que de la position respective de l'élément et des extrémités du solénoïde, mais nullement de la direction et de la courbure de l'axe du solénoïde. Il en est de même de l'action d'un solénoïde sur un conducteur d'une forme et d'une grandeur quelconque : cette action ne dépend que de la position des extrémités relativement au conducteur, et reste la même quelles que soient la forme et la direction de l'axe du solénoïde.

L'action d'un solénoïde sur un courant rectiligne indéfini perpendiculaire à son axe se réduit à deux forces appliquées au courant, dirigées dans un même plan perpendiculaire aux lignes qui mesurent les distances du courant indéfini aux deux extrémités du solénoïde et qui sont en raison inverse de ces distances.

Lorsqu'un solénoïde rectiligne, mobile autour de son milieu de manière à prendre autour de ce point toutes les positions possibles,

est soumis à l'action d'un courant indéfini, il se dirige toujours perpendiculairement au courant de manière que la direction du mouvement de l'électricité dans les parties des éléments les plus voisines du courant soit la même que dans ce dernier.

L'action d'un solénoïde sur un courant fermé se réduit à deux forces qui passent par les extrémités du solénoïde.

L'action mutuelle de deux solénoïdes peut toujours être représentée par quatre forces agissant en raison inverse du carré de la distance, et dirigées suivant les lignes qui joignent deux à deux les extrémités des solénoïdes, du moins quand les distances ne sont pas très-petites, et dont deux sont attractives et deux répulsives.

Pour reconnaître les actions des courants sur les solénoïdes et des solénoïdes entre eux, on prend un fil de cuivre recouvert de soie, que l'on tourne en hélice et qui revient par l'axe à l'origine de l'hélice; chaque spire étant équivalente à un courant circulaire et à un petit courant rectiligne dont la longueur est égale au pas de l'hélice, il s'ensuit que l'hélice produit le même effet qu'une série de courants circulaires en même nombre que les spires et qu'un courant rectiligne de même longueur que l'hélice : on voit d'après cela que, le courant revenant à l'origine, il ne reste que l'effet dû aux courants circulaires, projections de chaque spire sur des plans perpendiculaires à l'axe. Les conducteurs ainsi disposés portent le nom de *cylindres électro-dynamiques*. La fig. 649 représente un cylindre électro-dynamique mobile. En le suspendant aux coupes x et y de l'appareil fig. 636, et plaçant au-dessous un conducteur rectiligne horizontal, le conducteur mobile se dirige perpendiculairement au conducteur fixe; et en approchant des extrémités de l'appareil mobile un autre cylindre électro-dynamique (fig. 650), qu'on tient à la main, on peut facilement constater les attractions et les répulsions dont nous avons parlé.

La direction des actions exercées par les extrémités d'un solénoïde sur un élément de courant paraît singulière au premier abord : car jusqu'ici nous avons toujours vu les attractions et les répulsions des corps s'exercer suivant une ligne passant par un point de chacun des corps; mais on peut facilement s'en rendre compte.

Considérons deux systèmes de points matériels A et B (fig. 651), composés de molécules de même espèce, c'est-à-dire que celles de l'un agissent toutes par attraction ou toutes par répulsion sur celles de l'autre, avec des forces proportionnelles à leurs masses. Soient M, M', M'', etc., les molécules qui composent le premier, et

m une quelconque de celles du second, en composant successivement toutes les actions *ma*, *mb*, *md*, exercées par M, M', M'', etc., on obtiendra des résultantes dont la dernière sera l'action du système A sur le point *m*, et passera à peu près par le centre d'inertie de ce système. En raisonnant de même relativement aux autres molécules du système B, on trouvera que les résultantes correspondantes passeront aussi toutes très-près du centre d'inertie du système A et auront une résultante finale CC', qui passera aussi à peu près par le centre d'inertie du système B. Nous nommerons *centres d'action* les deux points C et C', extrêmement voisins des centres d'inertie par lesquels passe cette résultante générale : il est évident qu'elle ne tendra à imprimer à chaque système qu'un mouvement de translation, à cause des petites distances des centres d'action aux centres d'inertie.

Supposons, en second lieu, que, les molécules du second système restant toutes de même espèce, celles du premier soient les unes attractives, les autres répulsives, à l'égard des molécules du second système : les premières donneront une résultante *of* (fig. 652), passant par leur centre d'action N et par le centre d'action *o* de l'autre système ; de même les particules répulsives donneront une résultante *oc*, passant par le centre d'action P et par le même point *o*. La résultante générale sera donc la diagonale *og* ; et comme elle passe à peu près par le centre d'inertie du second système, elle ne tendra encore à lui imprimer qu'un mouvement de translation. Cette résultante est d'ailleurs dans le plan mené par les trois centres d'action *o*, N, P ; et quand les molécules attractives sont en même nombre que les répulsives, et agissent avec la même intensité, sa direction est, en outre, perpendiculaire à la droite *o*O, qui divise l'angle P*o*N en deux parties égales.

Considérons enfin le cas où les deux systèmes seraient composés l'un et l'autre de molécules d'espèces différentes. Soient N et P (fig. 653) les centres d'action respectifs des molécules attractives et répulsives du premier ; soient *n* et *p* les centres correspondants du second, de sorte qu'il y ait attraction entre N et *p*, ainsi qu'entre *n* et P, et qu'il y ait répulsion entre N et *n*, de même qu'entre P et *p* : les actions combinées de N et P sur *p* donneront une résultante dirigée suivant la diagonale *pe* ; semblablement, les actions de N et P sur *n* donneront une résultante *nf*. Pour avoir la résultante finale, on prolongera ces deux lignes jusqu'à leur rencontre en *o*, et prenant *om* = *pe* et *ok* = *nf* : la diagonale *ol* sera la résul-

tante cherchée, qui donnera l'action exercée par le système PN sur *pn*. Mais, comme le point *o* peut ne pas faire partie du système *pn*, il faudra concevoir qu'il soit lié à ce système d'une manière invariable sans l'être au système PN; et la force *ol* tendra généralement, en vertu de cette liaison, à donner au système B un mouvement de translation et un mouvement de rotation autour de son centre d'inertie.

Examinons maintenant la réaction exercée par le second système sur le premier. D'après l'axiome fondamental de la mécanique, que l'action et la réaction de deux particules l'une sur l'autre sont égales et directement opposées, il faudra pour l'obtenir composer successivement des forces égales et directement opposées à celles que les particules du premier système exercent sur les particules du second, et il est évident que la réaction totale ainsi trouvée sera toujours égale et directement opposée à l'action totale.

Dans le premier cas, la réaction sera donc représentée par la ligne C*f'* (fig. 631), égale et opposée à la résultante C' *f*, et que l'on pourra supposer appliquée au centre d'action du premier système qui se trouve sur sa direction : d'où il suit qu'en négligeant toujours la petite différence de situation du centre d'action et du centre d'inertie, on n'aura encore ici qu'un mouvement de translation.

Dans le second cas, la réaction sera de même représentée par *ov* (fig. 632), égale et opposée à *og*. Mais comme le point *o* n'appartient pas au premier système, et que généralement celui-ci ne sera pas traversé par la direction *ov*, il faudra concevoir que ce point *o* soit lié invariablement au premier système sans l'être au second, et par cette liaison la force *ov* tendra généralement à opérer sur le système PN un double mouvement de translation et de rotation. Au reste, cette force *ov* est dans le plan PoN, et lorsque les molécules attractives sont en même nombre que les répulsives et agissent avec la même intensité, sa direction est comme celle de *og* perpendiculaire à *o*O.

Enfin, dans le troisième cas, la réaction sera représentée par la ligne *o*λ (fig. 633), égale et opposée à la résultante *ol*, et appliquée comme elle au point *o*. Pour avoir l'action de NP sur *pn*, nous avons conçu tout à l'heure que ce point *o* était lié à ce second système *pn* sans l'être au premier PN. Pour avoir maintenant la réaction exercée sur celui-ci, nous concevrons la force *o*λ appliquée en un point situé en *o*, et lié au premier système PN sans l'être au

second. Cette force tendra encore généralement à opérer sur PN un double mouvement de translation et de rotation.

Si on compare ces indications de la théorie, aux directions des forces qui s'exercent dans les différents genres d'action que nous avons constatés, on verra aisément que les trois cas que nous venons d'examiner leur correspondent exactement. Lorsque deux éléments de conducteurs voltaïques agissent l'un sur l'autre, l'action et la réaction sont, comme dans le premier cas, dirigés suivant la droite qui joint les deux éléments; quand il s'agit de la force qui existe entre un élément de fil conducteur et un élément de solénoïde, les deux parties M et N (fig. 653 A) agissant presque en sens contraire avec des intensités égales, l'action et la réaction sont, comme dans le second cas, dirigées perpendiculairement à la droite qui joint l'élément du courant à l'élément du solénoïde; et enfin deux éléments de solénoïde exercent l'un sur l'autre une action plus compliquée que présente le troisième cas, et dont on ne peut de même rendre raison, qu'en la considérant comme le résultat de quatre forces, dont deux attractives et deux répulsives.

Action de la terre sur les courants.

1072. La terre agit sur les courants mobiles soumis à son influence, comme un courant fixe, dirigé de l'est à l'ouest, perpendiculaire au méridien magnétique et principalement accumulé vers l'équateur : par conséquent, ce courant peut être considéré comme rectiligne, indéfini et placé à une distance infinie des conducteurs mobiles. Alors, pour constater le fait que nous venons d'énoncer, il suffit d'en vérifier les différentes conséquences.

1073. *Action de la terre sur un courant horizontal mobile autour d'un axe horizontal.* On trouve par le calcul, que l'action d'un courant qui parcourt un cercle ou une ligne droite indéfinie sur une portion de courant infiniment petite est toujours perpendiculaire à cette dernière : il suit de là, qu'un courant quelconque rectiligne, soumis à l'action de la terre, sera constamment sollicité par des forces parallèles entre elles dans toute l'étendue du conducteur, à cause de la grande distance à laquelle se trouve placé le courant du globe. Ainsi, un courant horizontal librement suspendu ne doit prendre aucun mouvement dans le sens de sa longueur, mais se transporter parallèlement à lui-même, suivant le sens du cou-

rant. M. Faraday a vérifié ce fait en suspendant à un fil de soie très-long un fil métallique horizontal, dont les extrémités recourbées plongeaient chacune dans un vase plein de mercure; dans tous les azimuths le fil métallique s'avance comme s'il était tiré par des forces égales, parallèles, et perpendiculaires à la direction du fil. D'après ce qui précède, le courant mobile doit être repoussé au nord s'il va de l'ouest à l'est, et attiré vers le sud s'il va de l'est à l'ouest : c'est ce qui existe en effet.

1074. *Action de la terre sur un courant vertical mobile autour d'un axe vertical.* D'après ce que nous avons dit [1063], le courant vertical doit se porter à l'est s'il est descendant, et à l'ouest s'il est ascendant. Ce fait peut se vérifier au moyen du conducteur et de l'appareil fig. 592 : le plan du conducteur se dirige parallèlement au méridien magnétique, et, si l'on emploie le conducteur fig. 654, l'appareil reste en équilibre dans toutes les positions possibles.

1075. *Action de la terre sur un courant horizontal mobile autour d'un axe vertical.* Si le courant est mobile autour d'une de ses extrémités, il doit tourner d'une manière continue et avec un mouvement uniforme [1064]. On vérifie ce fait au moyen du conducteur mobile fig. 606, que l'on place sur l'appareil fig. 605 : l'effet sur les courants verticaux est nul, et la rotation a lieu de l'est à l'ouest en passant par le sud quand le courant a lieu de la circonférence au centre, et de l'ouest à l'est en passant par le sud quand le courant a lieu du centre à la circonférence.

La propriété de prendre tantôt un mouvement de rotation continu, tantôt une position fixe d'équilibre, par l'influence de la terre, n'appartient pas uniquement aux courants horizontaux ou verticaux. En effet, un petit courant rectiligne, situé d'une manière quelconque dans l'espace et soumis à l'influence de la terre, étant sollicité par une force perpendiculaire à sa direction, si ce petit courant est mobile autour d'un axe, il pourra arriver de deux choses l'une : ou, dans une certaine position, la direction de la force rencontrera l'axe, ou elle ne le rencontrera pas; dans le premier cas il y aura une position fixe d'équilibre, dans le second cas la rotation sera continue. Le premier cas est réalisé par un courant horizontal mobile autour d'un axe horizontal, ou par un courant vertical tournant autour d'un axe vertical; le second par un conducteur horizontal tournant autour d'un axe vertical.

On peut produire la rotation continue d'un courant par l'action de la terre, sans pile, au moyen de l'appareil fig. 636. *abdc* est

un vase annulaire en zinc; la tige *xy*, ainsi que l'étrier qui la supporte sont également en zinc; le conducteur mobile, ainsi que l'anneau qui le termine et qui plonge dans le liquide sont en cuivre. L'électricité développée, produit un courant, qui traverse l'eau acidulée et s'élève dans les conducteurs verticaux : alors le courant prend la direction indiquée par les flèches, et le conducteur mobile tourne de l'est à l'ouest en passant par le midi.

1076. *Action de la terre sur un courant qui suit une courbe fermée suspendue de manière à tourner autour d'un axe vertical.* Le plan de la courbe doit se diriger perpendiculairement au méridien magnétique [1067]. On constate ce fait au moyen du conducteur mobile fig. 657; suspendu dans les coupes de l'appareil fig. 656; aussitôt que le courant est établi, le conducteur se place perpendiculairement au méridien magnétique, de manière que le courant ascendant soit à l'ouest. Comme dans cet appareil le support empêche que le conducteur ne puisse faire une révolution complète dans tous les sens, on peut employer le conducteur fig. 658; il porte inférieurement un anneau couvert de soie à travers lequel passe la tige *mn* terminée par la coupe *x*, et l'autre extrémité du conducteur porte une coupe pleine de mercure qui repose par une tige isolante dans la coupe *x*, et dans laquelle plonge un fil communiquant avec l'autre extrémité de la pile.

M. de la Rive a construit des appareils très-simples, et qui se dirigent très-bien par l'influence de la terre : ces appareils consistent (fig. 659) en un morceau de liége traversé par deux plaques de cuivre et de zinc, réunies par un fil de cuivre; on fait flotter cet appareil sur de l'eau acidulée, et l'électricité dégagée par l'action du liquide sur le zinc produit un courant d'une intensité suffisante pour diriger l'appareil.

La direction que prend, par l'action de la terre, une courbe fermée, mobile autour d'un axe vertical, est une conséquence nécessaire de l'action de la terre sur un courant horizontal et sur un courant vertical. En effet, considérons d'abord le rectangle fig. 660 A : les deux courants horizontaux étant en sens contraire et égaux, les actions directrices de la terre se font équilibre; il ne reste alors que l'action de la terre sur les deux fils verticaux *bc*, *de* : si le courant suit la direction indiquée par les flèches, le conducteur *bc* tend à se porter à l'est, et le conducteur *de* à l'ouest; si la direction du courant était changée, ce serait le contraire. Dans les deux cas, les forces qui sollicitent les deux branches verticales con-

courent à donner au système la direction dans laquelle le courant inférieur va de l'est à l'ouest. Si on emploie un courant recourbé d'une manière quelconque, on peut décomposer chacun de ses éléments en deux parties, l'une horizontale et l'autre verticale. Or, pour toute courbe fermée, la somme des éléments horizontaux parcourus dans un sens sera égale à la somme des éléments horizontaux parcourus en sens contraire : il y aura, par conséquent, équilibre dans cette partie du système ; mais les courants verticaux tendront tous à prendre une position d'équilibre fixe qui sera évidemment la même, que l'axe de rotation coupe la courbe ou la laisse entièrement d'un côté.

Pour vérifier ces diverses conséquences, on peut employer le conducteur fig. 660, dans lequel l'action de la terre est augmentée par les révolutions du fil ; on le suspend dans les coupes x,y (fig. 636).

Lorsque l'on soumet à l'action de la terre un conducteur plan mobile autour d'un axe horizontal perpendiculaire au plan du méridien magnétique et qui passe par le centre de gravité du conducteur, le plan du conducteur mobile se dirige perpendiculairement à l'axe magnétique de la terre.

On peut encore vérifier l'influence terrestre en se servant du cylindre électro-dynamique fig. 649. Ce cylindre se dirige constamment de manière que les courants qui en parcourent les spires soient ascendants à l'ouest et descendants à l'est. Si le cylindre électro-dynamique était mobile autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité et perpendiculaire au méridien magnétique, l'axe du cylindre se dirigerait parallèlement à l'aiguille d'inclinaison.

Action réciproque des courants et des aimants.

1077. *Action d'un courant sur une aiguille horizontale.* (*Découverte de M. Œrsted.*) Soit AB (fig. 661) une aiguille de déclinaison en équilibre dans le méridien magnétique : si on place au-dessus un fil conducteur parallèle à l'axe de l'aiguille, dans lequel le courant soit dirigé du sud au nord, on observe que l'aiguille est déviée de sa direction, et que le pôle austral est porté vers l'ouest, et qu'il est dévié vers l'est (fig. 662), si le fil est placé au-dessous de l'aiguille. Si on place le conducteur à droite ou à gauche, dans le même plan horizontal que l'aiguille, cette dernière n'éprouve aucune déviation horizontale, mais elle s'incline

à l'horizon : lorsque le fil est à l'est, le pôle nord est élevé, et il est abaissé, quand le fil est à l'ouest. Dans chaque cas, la déviation serait opposée, si le courant dans le fil conducteur était dirigé du nord au sud.

1078. Ampère, en analysant la découverte de M. Œrsted, la réduisit à ces deux faits principaux : 1° Le courant électrique tend toujours à amener l'aiguille dans une direction perpendiculaire à la sienne; et, si elle reste ordinairement plus ou moins inclinée, c'est par l'influence du magnétisme terrestre : aussi, en équilibrant la force directrice du globe par un aimant convenablement placé, ou en disposant l'aiguille dans un plan perpendiculaire à l'axe magnétique du globe, ou enfin en rendant l'aiguille astatique par un moyen quelconque, elle se dirige toujours perpendiculairement au fil conducteur; une aiguille d'inclinaison bien centrée et astatique se place de même perpendiculairement à la direction du courant. 2° En supposant un observateur placé dans le fil conducteur, de manière que le courant arrive par les pieds et sorte par la tête, et qu'il ait la face dirigée vers le milieu de l'aiguille, dans toutes les positions possibles, la déviation qu'éprouve l'aiguille est telle, que le pôle austral est toujours porté à gauche de l'observateur. D'après cette règle, on peut facilement prévoir tous les phénomènes de déviation, et reconnaître le sens d'un courant.

Réciproquement, si un barreau aimanté horizontal est fixe, et qu'on en approche un conducteur horizontal mobile autour d'une ligne verticale, le courant se mettra à un angle droit sur l'aimant, de manière que le pôle austral soit à gauche du courant. Ce fait peut facilement se vérifier en suspendant le conducteur fig. 640 dans les coupes x, y de l'appareil fig. 636, et plaçant horizontalement au-dessous un barreau aimanté dans une position quelconque.

Nous avons déjà dit qu'Ampère considérait l'action de la terre sur les courants comme provenant de courants électriques dirigés de l'est à l'ouest dans le sens du mouvement apparent du soleil, et nous avons vu que cette hypothèse satisfait à tous les phénomènes que la terre produit sur les conducteurs mobiles. Pour expliquer ceux que les courants exercent sur les aimants, Ampère considérait ces derniers comme formés de courants qui parcourent des circuits fermés situés dans des plans perpendiculaires à leur axe magnétique; nous allons faire voir que cette hypothèse satisfait aussi à toutes les observations.

En effet, si une aiguille aimantée est formée de courants perpendiculaires à son axe, étant abandonnée à elle-même, elle se dirigera nécessairement de manière que les plans de ses courants et ceux du globe soient parallèles, et que les courants les plus voisins, c'est-à-dire ceux de la surface du globe où est placée l'aiguille, et ceux de la partie inférieure de l'aiguille, soient dirigés dans le même sens. Ainsi, sur la surface inférieure de l'aiguille, les courants iront de l'est à l'ouest; sur la surface supérieure, de l'ouest à l'est; ils seront ascendants sur la surface ouest, et descendants sur la face est. La fig. 663 représente la disposition des courants dans la terre et dans l'aiguille. Alors, si l'on place parallèlement à l'axe et au-dessus de l'aiguille un conducteur dont le courant soit dirigé du sud au nord, les courants de la partie supérieure de l'aiguille, étant dirigés de l'ouest à l'est, tendront à se disposer parallèlement à ceux du courant, et le pôle nord de l'aiguille déclinera vers l'ouest. Si on met le conducteur au-dessous de l'aiguille, les courants en regard du conducteur étant dirigés de l'est à l'ouest, il est évident que le pôle nord de l'aiguille devra être dévié vers l'est; si on place l'aiguille dans le même plan horizontal, et à l'est du conducteur, les courants de la face ouest étant ascendants, le pôle nord de l'aiguille sera abaissé, et, le fil étant placé du côté opposé, le même pôle sera élevé.

1079. Tous les autres phénomènes que présentent les actions des aimants et des conducteurs s'expliquent, dans cette hypothèse, avec la même facilité; mais, avant d'exposer ces phénomènes, nous commencerons par examiner, dans l'hypothèse d'Ampère, la position du point d'application de la résultante de l'action d'un courant sur le pôle d'une aiguille, dans les différents cas qui peuvent se présenter; et, pour cela, nous partirons de la loi de l'action d'un élément de courant sur l'extrémité d'un solénoïde, que nous supposerons être la même que celle d'un élément de courant sur un pôle magnétique. Cette action, comme nous l'avons déjà dit, est perpendiculaire au plan qui passe par l'extrémité du solénoïde et par l'élément de courant; elle est proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction de la ligne qui joint le pôle et l'élément avec celle du courant, et en raison inverse du carré de la distance.

1080. *Action d'un conducteur rectiligne indéfini sur le pôle d'un aimant.* Considérons d'abord un courant rectiligne indéfini MN (fig. 664), agissant sur le pôle A d'un aimant : il est évident que, toutes les actions élémentaires étant parallèles et appliquées aux

différents points de MN, la résultante totale passera par MN, et il résulte du calcul que cette force est en raison inverse de la plus courte distance du point A au courant.

En effet, soit mn un des éléments du courant; en désignant par C l'intensité du courant et par F celle du pôle de l'aimant ou du solénoïde, l'intensité de l'action exercée par le pôle A sur l'élément mn, ou ds sera

$$\frac{CFds \sin \varphi}{r^2}, \text{ ou } \frac{CFds \cos \theta}{r^2}.$$

Si nous désignons par a la distance AC de l'aiguille au courant, on aura

$$ads = r^2 d\theta \text{; d'où } ds = \frac{r^2 d\theta}{a} :$$

alors l'action du pôle sur l'élément de courant devient

$$\frac{CFr^2 \cos \theta d\theta}{ar^2} = \frac{CF \cos \theta d\theta}{a};$$

et, en intégrant cette expression depuis $\theta = \frac{\pi}{2}$, jusqu'à $\theta = -\frac{\pi}{2}$, on trouve $\frac{2CF}{a}$ pour l'action totale du courant sur le pôle de l'aimant.

Si le courant n'était pas indéfini, en désignant par θ' et $-\theta''$ les valeurs de θ pour les éléments extrêmes, on aurait pour la valeur de la résultante totale

$$CF.\frac{\sin \theta' + \sin \theta''}{a}.$$

1081. *Action d'un circuit fermé sur un des pôles d'un aimant.* La résultante finale passe toujours par le pôle de l'aimant. En effet, supposons d'abord que le circuit soit circulaire, et que le pôle de l'aimant soit dans le plan du cercle.

Soient A (fig. 663) le pôle de l'aimant, $mm't$ le circuit que l'électricité parcourt dans le sens indiqué par les flèches; par le point A menons deux tangentes Am et Am', et deux droites infiniment rapprochées As et At; elles intercepteront sur la circonférence deux arcs qr et st, que l'électricité parcourt dans des sens contraires. Les actions exercées par chacun de ces deux éléments se réduisent, comme nous l'avons vu, à une force perpendiculaire au plan du cercle et passant par le milieu des deux éléments; ces forces sont dirigées en sens contraires et ont des intensités représentées par qr sin Aqr : Aq^2 et st sin Ats : As^2; mais, comme les angles Aqr et Ats ont pour mesure, le premier 1/2 ($qs + qr$), et le second 1/2 ($qs + st$), qui ne diffèrent que d'une quantité infiniment petite :

il s'ensuit que les angles Aqr et Ast sont égaux ; et, par conséquent, que les triangles Aqr et Ast sont semblables, et enfin que les arcs rq et st sont proportionnels à leur distance au point A. Alors les intensités des forces sont en raison inverse de leurs distances au point A, et, par suite, leur résultante passe par ce point. Comme il en sera de même de tous les systèmes de droites très-voisines tracées entre les tangentes Am et Am', il en résulte évidemment que les deux parties du circuit mrm' et mtm' produisent deux systèmes de forces parallèles opposées, dont la résultante unique passe par le point A. Ce principe n'est pas borné au cas particulier que nous venons de considérer; il est général, et s'applique à un circuit fermé d'une forme quelconque.

1082. En effet, considérons d'abord un élément mm' (fig. 666) et un pôle A d'un aimant; supposons que l'aimant puisse tourner autour d'une droite quelconque AB passant par le pôle, et cherchons le moment de rotation de l'élément mm' autour de cet axe. L'intensité de la force appliquée à l'élément sera CF $\sin \varphi ds : r^2$ (1). Désignons par du le double de l'aire du triangle mAm' : on aura $du = r \sin \varphi ds$. Alors l'expression (1) devient CF $du : r^2$. La force appliquée à l'élément de courant étant perpendiculaire au plan du triangle mAm', il faut, pour obtenir le moment de rotation, prendre la composante de cette force perpendiculairement au plan OAB, et multiplier cette composante par la distance du point O à l'axe de rotation. Or, en désignant par E l'angle des plans mAm' et OAB, la composante sera CF $du \cos$ E : r^2; et, comme $du \cos$ E représente la projection de l'aire du sur le plan OAB, en désignant par θ l'angle que OA fait avec AB, cette aire pourra être représentée par $r^2 d\theta$; mais la perpendiculaire abaissée de O sur AB ayant pour longueur $r \sin \theta$, le moment de rotation sera CF $\sin \theta d\theta$. Si nous supposons maintenant que le courant soit LL' (fig. 667), il faudra intégrer l'expression CF $\sin \theta d\theta$, depuis θ' jusqu'à θ'', et la valeur de cette intégrale sera CF $(\cos \theta'' - \cos \theta')$. Si le circuit est fermé, $\theta' = \theta''$, et l'expression précédente devient nulle : ainsi, dans ce cas, le moment de rotation est nul; or, comme l'action n'est pas nulle en général, il faut nécessairement que la force passe par le pôle de l'aimant.

Ainsi l'action d'un circuit fermé sur le pôle d'un aimant passe toujours par ce pôle; or, comme les corps conducteurs qui réunissent les pôles d'une pile et la pile elle-même forment toujours un circuit fermé dans lequel le courant traverse la pile comme les conducteurs, il s'ensuit que l'action d'un courant sur le pôle d'un aimant se réduit toujours à une force unique qui passe par le pôle de l'aimant. Il n'y a à ce principe qu'une seule exception : si l'aimant faisait lui-même partie du circuit, ou si le courant passait par un corps invariablement fixé à l'aimant, cette partie du circuit ne

pourrait imprimer aucun mouvement au pôle de l'aimant, parce qu'il y aurait une réaction égale et opposée du pôle sur les éléments de ce courant qui tendrait à lui donner un mouvement contraire. C'est ce dont on se rend plus facilement compte en considérant l'aimant comme un solénoïde : alors, tous les éléments du courant et des petits circuits circulaires agissant suivant les droites qui les joignent, les actions et les réactions tendent à rapprocher ou à éloigner ces éléments; et, les actions et les réactions étant égales et opposées, la liaison de ces points détruit complétement les effets qui seraient produits si chacun d'eux était indépendant. Dans ce cas, la force qui agit pour faire mouvoir l'aimant résulte du courant qui se termine aux points où il pénètre et sort de l'aimant ou du corps invariablement lié avec lui : cette force est alors appliquée en un point qui dépend de la forme du circuit.

Quant à la force qui ferait mouvoir le circuit s'il était libre, cette force devant être égale et opposée à celle qui ferait mouvoir l'aimant et appliquée au même point, puisque, si l'aimant et le courant étaient solidaires, les actions réciproques de l'aimant et du courant ne pourraient produire aucun mouvement dans le système; il s'ensuit que cette force passe toujours par le pôle de l'aimant. Mais pour qu'il en soit ainsi, il faut nécessairement que les différentes parties du circuit soient solidaires, car c'est la résultante totale qui passe par ce point. Si le circuit, et c'est ce qui arrive toujours, était composé de deux parties, l'une fixe et l'autre mobile, cette dernière se mouvrait en vertu de l'action du pôle de l'aimant sur les éléments qui la composent, et cette résultante passerait par un point qui varierait avec la forme et l'étendue de cette partie mobile du circuit.

1083. Il résulte de ce qui précède que, quand le pôle d'un aimant est soumis à l'action d'un courant rectiligne très-long MPN (fig. 668), ce courant faisant toujours partie d'un circuit fermé, la force est réellement appliquée au pôle de l'aiguille, et non pas au courant lui-même, comme cela arriverait si on pouvait produire un courant rectiligne isolé, et elle varie suivant une loi différente. Mais si le circuit fermé est composé d'une partie rectiligne MN très-voisine de l'aiguille et d'une partie d'une forme quelconque très-étendue MPN, alors la résultante totale passera par le pôle de l'aimant; mais cette force variera sensiblement suivant la même loi que la résultante partielle du courant rectiligne, c'est-à-dire en raison inverse de la plus courte distance du pôle au courant.

En effet, supposons d'abord que tout le circuit soit dans un même plan passant par le point A. L'action du pôle A sur MN est appliquée au point m, celle de A sur le reste MPN du circuit est appliquée au point n, et ces forces sont nécessairement parallèles, opposées, et situées dans un même plan passant par le point A, puisque leur résultante passe par ce point. Alors, en désignant la première force par R, la seconde par S, la distance Am par a, la distance An par b, on aura Ra = Sb; mais à mesure que la partie MPN du circuit s'allongera, que le point P s'éloignera, b augmentera, et alors S diminuera, et comme la force appliquée au point A est R — S, quand S sera très-petit par rapport à R, on pourra supposer que R — S suit la même loi que la force R, c'est-à-dire qu'elle est en raison inverse de a.

Si la seconde partie du circuit n'était pas dans le plan AMN, la résultante de cette partie du circuit serait encore dans le plan mené par le point A et la résultante de la partie MN, puisque la résultante finale doit passer par le point A : car deux forces n'ont une résultante qu'autant qu'elles sont dans un même plan. Alors, en désignant par tu (fig. 669) la résultante de la deuxième partie du circuit, par rs celle de la première, An sera la direction de la résultante finale, et, en abaissant sur tu la perpendiculaire Ap, les forces seront en raison inverse de Ar et Ap. On voit facilement qu'à mesure que la résultante tu s'éloignera, la résultante finale s'approchera toujours davantage d'être parallèle et égale à rs. Ainsi, quand la seconde partie du circuit sera très-éloignée, que l'aiguille sera très-voisine du courant rectiligne, on pourra toujours considérer la résultante finale comme sensiblement égale à la résultante de la partie rectiligne du courant voisine de l'aiguille; mais cette force sera appliquée au pôle de l'aimant, et non pas au courant rectiligne lui-même, comme cela aurait lieu si cette partie rectiligne agissait seule. En d'autres termes, quand un circuit est composé de deux parties, l'une rectiligne, l'autre d'une forme quelconque, cette dernière partie modifie la résultante de la partie rectiligne de trois manières, en changeant son point d'application, sa valeur et sa direction : la première modification est toujours la même, quelle que soit la forme du circuit; elle consiste toujours à transporter le point d'application du courant au pôle; et les deux autres peuvent, au contraire, être atténuées autant qu'on voudra. Cela posé, nous allons rapporter les expériences faites par MM. Biot et Savart pour déterminer la loi des actions des courants sur les aiguilles aimantées.

1084. *Expériences de MM. Biot et Savart.* Une aiguille aimantée *ab* (fig. 670) suspendue à un fil de cocon et rendue sensiblement astatique par un aimant convenablement placé, fut mise en regard d'un courant rectiligne très-long MN, faisant partie d'un circuit fermé très-étendu. L'aiguille se dirigea perpendiculairement au courant, le pôle austral à gauche, et y resta en équilibre stable. Il résulte de ce fait plusieurs conséquences importantes. D'abord, en quelque lieu que les forces qui sollicitent l'aiguille soient appliquées, on peut toujours concevoir ces forces décomposées en deux, l'une passant par le centre de rotation, et l'autre par le pôle de l'aimant. La première étant sans influence, on pourra considérer les mouvements de l'aiguille comme résultant des forces appliquées à ses pôles. Mais l'aiguille *ab* (fig. 671) restant en équilibre dans une position perpendiculaire à la plus courte distance *oo* de son centre au courant, et les pôles étant égaux et à la même distance du centre de rotation, il en résulte que les forces qui sollicitent les pôles sont égales et symétriquement placées par rapport à la ligne *oo*: ainsi l'angle *m* est égal à l'angle *m'*. De plus, comme l'équilibre est stable, les forces sont dirigées suivant *ae* et *bf*. En effet, si on incline *ab* d'une quantité très-petite, la distance *oo* étant très-grande relativement à l'aiguille, les intensités et les directions des forces ne changeront pas sensiblement. Supposons que ce soit le point *a* qui se rapproche de *o*, la direction de la force *ae* se rapprochera de celle de *ab*, et, par conséquent, la composante de la force perpendiculaire à l'aiguille diminuera, et ce sera évidemment le contraire de l'autre côté : par conséquent l'excès de la force développée en *b* ramènera l'aiguille à sa position primitive; il est facile de voir que, si les forces étaient dirigées en sens contraire, l'équilibre serait instable. Il résulte aussi de la position de l'aiguille, que les directions des forces sont perpendiculaires aux lignes *ac* et *bc*. En effet, si on suppose que le pôle *b* coïncide avec le pôle *a*, l'action au point *a* devra être nulle : ainsi les forces résultant des deux pôles devront être égales et opposées. Mais il n'y a aucune raison pour que la ligne *ac* soit plus inclinée du côté de la force qui résulte de l'action du pôle boréal que de celle qui résulte de l'action du pôle austral : ainsi la ligne *ae* sera perpendiculaire à la direction commune des forces.

L'aiguille, étant très-peu dérangée de sa position d'équilibre, faisait autour d'elle des oscillations isochrones, comme un pendule dérangé de la verticale : il en résultait qu'à chaque instant

la force qui sollicitait l'aiguille était sensiblement proportionnelle à l'angle d'écart, et, par suite, qu'on pouvait appliquer à ces oscillations la formule du pendule. On peut d'ailleurs facilement se rendre compte de ce résultat, en observant que, dans les circonstances de l'expérience, l'aimant étant très-court, et les oscillations très-petites, la distance des pôles au courant n'éprouvait que de faibles variations, et que les forces étant toujours perpendiculaires aux plus courtes distances des pôles au courant, restaient sensiblement parallèles; alors les forces qui produisaient les oscillations provenaient uniquement des variations d'inclinaison des forces primitives sur les normales aux pôles de l'aiguille dans ses différentes positions.

Ainsi on pouvait mesurer la force qui faisait osciller l'aiguille dans chaque position du courant au moyen de la formule du pendule, et pour chaque distance son intensité était en raison inverse du carré du temps qui correspondait à un même nombre d'oscillations.

En faisant ainsi osciller l'aiguille à différentes distances du conducteur, MM. Biot et Savart ont trouvé que les forces étaient en raison inverse des distances.

Ces expériences ont exigé beaucoup de soins et des précautions minutieuses; et comme à l'époque où elles ont été faites, on ne connaissait pas encore les piles à effet constant, il fallait corriger les erreurs qui résultaient inévitablement de leurs variations. Pour cela, MM. Biot et Savart ont employé la méthode des observations alternatives, dont Coulomb s'était servi le premier, pour déterminer les tensions sur les différents points de la surface d'un corps électrisé [902]. On faisait une observation à une distance D du centre de l'aiguille au conducteur, puis à la distance D', une nouvelle à la distance D, et ainsi de suite, et on prenait les moyennes des observations de rangs pairs et de rangs impairs.

Ainsi les expériences faites sur les oscillations d'une aiguille, conduisent aux résultats qu'Ampère avait déduits de considérations purement théoriques. Il faut bien remarquer que la loi trouvée par MM. Biot et Savart n'aurait plus lieu si les forces étaient appliquées sur le conducteur, car alors il faudrait transporter les forces aux pôles de l'aiguille; elles seraient augmentées à peu près proportionnellement aux distances de ces pôles au conducteur; et, comme ces forces sont en raison inverse des mêmes distances, les forces produisant l'oscillation, et par conséquent les temps des oscillations, ne

varieraient pas avec la distance. Mais cette supposition d'un courant indéfini ne peut pas se réaliser : toujours, quand c'est l'aiguille qui est mobile, le circuit était fermé, la résultante passe par le pôle de l'aiguille, et la force totale suit sensiblement les lois des actions du courant rectiligne.

De la loi relative à la résultante totale, Laplace déduisit l'action de chaque élément de courant sur un pôle de l'aiguille, et il trouva que cette action, appliquée au pôle, était perpendiculaire au plan passant par le pôle et l'élément, et en raison inverse du carré de la distance. Mais cette loi pouvait être modifiée par un coefficient dépendant de l'inclinaison de chaque élément sur sa distance au pôle : il restait alors à faire de nouvelles expériences pour savoir si ce coefficient existait réellement, et quelle était sa composition.

Pour cela, MM. Biot et Savart ont disposé le fil conducteur comme l'indique la fig. 673. Les deux parties XY et YZ étaient également inclinées à l'horizon ; la distance du point Y à l'aiguille était constante, et on faisait seulement varier l'angle α. L'expérience fit connaître que l'action totale variait proportionnellement à la tangente de la moitié de l'angle α. De ce résultat de l'observation, Laplace déduisit, que l'intensité de l'action d'un élément de courant variait proportionnellement au sinus de l'angle que fait avec la direction du courant la ligne qui joint le pôle de l'aimant avec l'élément du courant.

Ce dernier résultat peut facilement se déduire de la loi élémentaire : en effet, dans le cas où le courant est plié (fig. 673), l'action du pôle A sur l'élément D est $\frac{k \sin\varphi\, ds}{r^2}$, et on a $r = a\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi}$;

mais $$DE = r\cos\varphi = \frac{a\sin\alpha}{\sin\varphi}\cos\varphi = a\sin\alpha\cot\varphi\,;$$

et, en différenciant cette équation, il vient

$$ds = -a\,\frac{\sin\alpha\, d\varphi}{\sin^2\varphi}\,:$$

alors l'action de l'élément ds sur le pôle A est

$$-k\sin\varphi\,\frac{\sin^2\varphi}{a^2\sin^2\alpha}\cdot\frac{a\sin\alpha}{\sin^2\varphi}\,d\varphi = -k\,\frac{\sin\varphi\, d\varphi}{a\sin\alpha}\,,$$

et l'action du conducteur XYZ sur le pôle A est égale à

$$-\frac{2k}{a\sin\alpha}\int_0^\alpha \sin\varphi\, d\varphi = \frac{2k}{a\sin\alpha}(1-\cos\alpha) = \frac{2k}{a}\cdot\frac{2\sin^2\frac{1}{2}\alpha}{2\sin\frac{1}{2}\alpha\cos\frac{1}{2}\alpha}$$
$$= \frac{2k}{a}\tang\tfrac{1}{2}\alpha.$$

1085. Ainsi, il est maintenant bien constaté que les lois de l'action d'un pôle magnétique sur un élément de courant sont exactement celles des actions d'un pôle de solénoïde sur un élément de courant, et que la force dirigée perpendiculairement au plan qui passe par le pôle et l'élément est en raison inverse du carré de la distance.

Nous admettrons en outre, d'après la théorie d'Ampère, que les forces élémentaires sont appliquées aux éléments de courants; que la résultante de l'action totale d'un circuit fermé sur le pôle d'un aimant passe par ce pôle; et que, lorsqu'un aimant agit sur un circuit qui est toujours fermé, mais dont une partie seule est mobile, la force qui produit le mouvement de cette partie du circuit est appliquée en un point qui dépend de sa forme, et qui ne passe pas par le pôle de l'aimant.

1086. *Action directrice d'un conducteur rectiligne horizontal sur une aiguille de déclinaison.* Soient AB (fig. 674) une aiguille aimantée horizontale mobile autour du point O, MN un courant horizontal : en supposant le courant rectiligne très-long, l'aiguille très-voisine, et le reste du circuit très-éloigné, les forces appliquées aux pôles seront perpendiculaires aux plus courtes distances des pôles au courant; par conséquent, elles seront horizontales et perpendiculaires à la direction de l'aiguille, quand l'aiguille et le fil seront parallèles; et, comme les forces appliquées aux pôles agissent en sens contraires, leurs effets s'ajouteront, et l'aiguille tournera. Mais à mesure qu'elle changera de position, la direction de la force appliquée au pôle s'inclinera sur le plan que l'aiguille peut parcourir, puisque cette force est perpendiculaire à la plus courte distance du pôle au courant; et, cette force étant toujours dans le plan vertical mené par le pôle, sa composante horizontale perpendiculaire à la direction de l'aiguille deviendra de plus en plus petite, et l'équilibre s'établira, quand cette composante sera égale à la force directrice de la terre, ou quand elle sera nulle, si l'aiguille est astatique; ce qui arrivera évidemment lorsque l'aiguille deviendra perpendiculaire au courant.

Nous pouvons même calculer l'intensité de l'action exercée par le courant sur l'aiguille, dans la supposition que nous avons admise, c'est-à-dire quand l'aiguille est assez rapprochée du courant rectiligne, et le reste du circuit assez éloigné pour que l'on puisse admettre que la force totale suive sensiblement les lois de l'action du courant rectiligne Pour cela désignons par l la demi-distance des pôles de l'aiguille, par C l'intensité du courant, par F et f

les intensités magnétiques de l'aiguille et de la terre, et par φ la déviation de l'aiguille dans l'état d'équilibre : alors la force directrice de la terre sera $Ff \sin\varphi$. Pour trouver l'action du courant sur le pôle A (fig. 675), abaissons du point A la perpendiculaire AP sur le courant MN, la force sera dirigée perpendiculairement à AP, et dans le plan APQ perpendiculaire au courant, et son intensité sera F. C : AP ; sa composante horizontale sera F. C. sin PAQ : AP, et la composante perpendiculaire à la direction de l'aiguille sera F. C. sin PAQ. cos φ : AP ; mais sin PAQ = PQ : AP = d : AP. Ainsi dans l'état d'équilibre l'action du courant est

$$\frac{F.C.d}{AP^2}\cos\varphi = \frac{F.C.d\cos\varphi}{d^2+l^2\sin^2\varphi}\text{ ; et on a, }\frac{F.C.d\cos\varphi}{d^2+l^2\sin^2\varphi} = Ff\sin\varphi\text{ ;}$$

d'où
$$C = f\tang\varphi\left(\frac{d^2+l^2\sin^2\varphi}{d}\right).$$

Ainsi la déviation φ est indépendante de l'intensité magnétique de l'aiguille.

1087. *Action attractive et répulsive des aimants et des conducteurs.* Outre l'action directrice exercée par le fil conducteur sur l'aiguille aimantée, Ampère a découvert que ce même fil exerce sur un aimant une autre action, tantôt attractive et tantôt répulsive. Cette action est à son maximum quand la direction du fil forme un angle droit avec l'axe d'un aimant, et de signe contraire, pour une même direction du courant, quand le point où cet axe est coupé par la ligne qui mesure la plus courte distance au fil, se trouve dans l'intervalle compris entre les pôles, ou hors de cet intervalle. Quand la plus courte distance du fil et de l'aimant rencontre ce dernier entre les pôles, il y a attraction si le pôle austral de l'aimant est à droite du courant, et répulsion dans le cas contraire.

On vérifie ce fait en approchant un conducteur vertical d'une aiguille horizontale qui ne peut se mouvoir que parallèlement à elle-même, ou en suspendant un faible barreau aimanté à un fil de soie, et approchant un conducteur horizontal.

On peut facilement se rendre compte de ces effets. Nous avons vu, en parlant des expériences de MM. Biot et Savart, que, quand une aiguille AB (fig. 676) mobile autour de son centre était sollicitée par un courant perpendiculaire au plan qu'elle peut décrire, l'aiguille se plaçait perpendiculairement à la plus courte distance du courant à l'aiguille, et que les forces étaient toutes deux dirigées du même côté de l'aiguille. Supposons que l'aiguille soit fixe, faisons mouvoir le courant parallèlement à lui-même, et examinons les directions que prendront les forces, en nous rappelant qu'elles sont toujours perpendiculaires aux lignes Am et Bm. Si nous supposons

que le point m s'approche de la ligne Ay perpendiculaire à AB, la direction de la force appliquée au point A se relèvera toujours davantage; elle sera dirigée suivant AB lorsque le point m sera sur Ay, et lorsque le point m aura dépassé cette ligne, la force s'inclinera en sens contraire, tandis que la force appliquée au point B restera toujours dirigée vers la droite de AB; le contraire aurait évidemment lieu si le point m s'approchait de la ligne Bn et la dépassait ensuite. Ainsi, tant que le fil conducteur sera renfermé entre les plans horizontaux qui passent par les lignes Ay et Bn, les composantes horizontales des forces seront dirigées dans le même sens, l'effet sera égal à leur somme, et l'aiguille sera portée vers le conducteur ou en sens contraire suivant le sens du courant; mais quand le courant aura dépassé la ligne Ay ou Bn, une des deux composantes changera de signe, et on conçoit qu'au delà, le sens du mouvement pourra être changé.

On peut déterminer les positions du courant où ces changements de sens du mouvement auront lieu : en effet, d'après ce qui précède, les composantes des forces parallèles a, Ay, sont

$$\text{FC} \cos a : \text{A}m, \quad \text{et} \quad \text{FC} \cos b : \text{B}m,$$

et la force qui produit le mouvement est

$$\text{FC} (\cos a : \text{A}m + \cos b : \text{B}m).$$

Cos a changera de signe quand le point m depassera Ay, et l'action, d'abord positive quand le second facteur sera positif, deviendra nulle avec lui, et changera de signe quand il deviendra négatif : ainsi, en égalant à zéro le second facteur, nous pourrons déterminer les lieux pour lesquels l'action du courant sur l'aiguille est nulle. En désignant par x et y les coordonnées du point m, on a

$$\cos a = x : \text{A}m, \quad \cos b = (2l - x) : \text{B}m,$$
$$\overline{\text{A}m}^2 = x^2 + y^2, \quad \overline{\text{B}m}^2 = y^2 + (2l - x)^2;$$

et, pour l'équation de la courbe cherchée,

$$\frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{2l - x}{y^2 + (2l - x)^2} = 0, \quad \text{ou } y^2 - x^2 + 2lx = 0.$$

Cette équation appartient à une hyperbole équilatère rapportée à son sommet : ainsi, quand le fil, en restant parallèle à sa direction primitive, passera par les différents points de cette courbe hyperbolique, son action sur l'aiguille sera nulle.

On pourrait facilement résoudre le problème d'une manière plus générale en supposant l'axe de rotation de l'aiguille placé en un point quelconque de

sa direction : en effet, soient (fig. 677) AB l'aiguille, m le point de rencontre du conducteur rectiligne avec un plan mené par l'axe de l'aiguille perpendiculairement au conducteur, O la projection de l'axe de rotation, $2l$ la longueur AB de l'aiguille, x et y les coordonnées du point m, rapportées aux axes AX et AY, et λ la distance AO. Dans le cas de la figure, les forces agissent dans le même sens, et les moments de rotation sont évidemment

$$\mathrm{FC}.\mathrm{O}p : \mathrm{A}m, \quad \text{et } \mathrm{FC}.\mathrm{O}q : \mathrm{B}m,$$

et la somme des moments sera

$$\mathrm{FC}\left(\frac{\mathrm{O}p}{\mathrm{A}m} + \frac{\mathrm{O}q}{\mathrm{B}m}\right);$$

par conséquent, pour obtenir la courbe d'équilibre, il faudra, comme précédemment, égaler à zéro le second facteur. Or, il est facile de reconnaître, à l'inspection de la figure, qu'on a

$$\mathrm{O}p = \mathrm{AO}\cos a = \lambda\cos a, \quad \mathrm{O}q = \mathrm{BO}\cos b = (\lambda - 2l)\cos b;$$

$$\cos a = x : \mathrm{A}m, \quad \cos b = (2l - x) : \mathrm{B}m;$$

et $$\overline{\mathrm{A}m}^2 = x^2 + y^2, \quad \overline{\mathrm{B}m}^2 = y^2 + (2l - x)^2.$$

Ainsi l'équation de la courbe cherchée est

$$\frac{\lambda x}{x^2 + y^2} + \frac{(\lambda - 2l)(2l - x)}{(2l - x)^2 + y^2} = 0 \ldots. (a).$$

Si le point de suspension était placé à une distance infinie, on aurait $\lambda = \infty$, et l'équation (a) deviendrait

$$y^2 - x^2 + 2lx = 0,$$

équation que nous avons déjà trouvée précédemment.

Si on supposait que le centre de rotation fût au centre de l'aiguille, il faudrait faire $\lambda = l$ dans l'équation (a), qui deviendrait alors

$$(x - l)(x^2 + y^2 - 2lx) = 0,$$

équation qui peut être satisfaite en posant

$$x - l = 0, \quad \text{ou } x^2 + y^2 - 2lx = 0.$$

La première équation est celle d'une droite perpendiculaire à l'aiguille, et passant par son centre ; la seconde est celle d'un cercle décrit sur AB comme diamètre (fig. 677 A). Ainsi, quand le conducteur rencontrera le plan que l'aiguille peut parcourir en un point de la droite MN ou du cercle ABC, l'aiguille restera immobile.

Enfin, si on suppose que l'aiguille soit mobile autour d'une extrémité, celle placée à l'origine, en faisant $\lambda = 0$ dans l'équation (a), il vient

$$2l - x = 0,$$

équation qui appartient à une droite perpendiculaire à la direction de l'aiguille, et passant par l'extrémité B.

1088. L'action étant toujours égale et opposée à la réaction, il s'ensuit que, si l'aiguille devenait fixe et le conducteur mobile, on obtiendrait des phénomènes semblables à ceux que nous venons de décrire. Ainsi, en plaçant horizontalement un aimant devant le côté vertical *qm* du conducteur mobile astatique (fig. 659), le courant sera attiré ou repoussé suivant le sens du courant et les positions relatives des pôles, du courant et de l'axe de rotation, du moins quand l'équilibre n'existera pas.

1089. On peut facilement déduire de ce qui précède que, quand un conducteur rectiligne mobile autour d'un axe parallèle est soumis à l'action d'un aimant perpendiculaire à sa direction, dont les deux pôles sont placés de chaque côté, le conducteur est amené au milieu de l'aimant, lorsque la gauche du courant regarde le pôle austral; et que, dans le cas contraire, le conducteur peut rester en équilibre instable au milieu de l'aimant; mais, pour peu qu'il soit écarté de cette position, il continue de s'en éloigner, parce que, dans le premier cas, les actions des deux pôles sont répulsives, que dans le second elles sont attractives, et que ces actions augmentent à mesure que la distance diminue. Cette expérience peut se faire au moyen du conducteur mobile fig. 659.

1090. Un aimant exerce sur un fil conducteur, contourné autour de son axe, et dans un plan perpendiculaire à cet axe, une action attractive ou répulsive qui est encore une conséquence de ce qui précède, et que l'on peut vérifier à l'aide d'un anneau électro-dynamique flottant (fig. 659). Examinons d'abord le cas où le plan du conducteur passe par le centre du barreau. En considérant l'aimant comme un solénoïde, il est facile de voir que son action sur le conducteur tend à le faire mouvoir parallèlement à l'axe de l'aimant, quand la direction du courant du fil est la même que celle des courants de l'aimant, et qu'elle tend au contraire à le maintenir en équilibre stable au milieu de l'aimant, quand le courant du fil se meut dans une direction opposée à ceux de l'aimant.

Si on présente l'aimant au cercle de manière qu'il soit tout entier et toujours hors du cercle, le conducteur s'approche de l'aimant, quand les courants sont dans la même direction, et s'en éloigne dans le cas contraire. Ces attractions et ces répulsions deviennent bien plus énergiques en employant le conducteur astatique fig. 679.

Si on place un aimant dans un des anneaux du conducteur astatique fig. 678, de manière que l'axe de l'aimant passe par le

centre, qu'il soit perpendiculaire au plan du conducteur, et que le pôle austral soit à droite du courant, tous les éléments du cercle sont attirés par le barreau, et il y a équilibre; mais, si le cercle est un peu incliné sur le barreau, les attractions sur les demi-circonférences tendront à diminuer les angles aigus, et les deux parties de l'anneau viendront s'appliquer contre les parties opposées de l'aimant. Si le pôle austral est à gauche, tous les éléments du cercle sont repoussés et l'équilibre est stable : car, si le cercle se trouvait incliné, les forces répulsives émanées du barreau tendraient à augmenter les angles aigus, et, par conséquent, à rétablir la position à angle droit.

Quand le barreau est placé hors du cercle et à côté, les courants de l'aimant du côté du conducteur auront des positions différentes, relativement aux deux demi-circonférences situées de chaque côté de l'axe de révolution. Si la plus voisine du barreau est attirée, la plus éloignée sera repoussée, et l'équilibre sera stable. Dans le cas de répulsion de la demi-circonférence voisine, l'équilibre sera instable, et la plus faible inclinaison fera tourner l'appareil d'une demi-circonférence.

Supposons maintenant que le cercle puisse se mouvoir autour d'une ligne verticale qui ne passe pas par son centre (fig. 690); plaçons un barreau aimanté perpendiculaire au plan mobile, et de manière que son milieu soit dans ce plan et au centre du cercle. Si les courants dans le conducteur et dans l'aimant sont dirigés en sens opposés, il y a équilibre stable dans cette position; dans le cas contraire, l'équilibre est instable : car aussitôt que le plan mobile ne passe plus par le milieu de l'aimant, chaque élément tend à se mouvoir dans le sens du plus petit segment du barreau. Quand le barreau est hors du cercle, à côté, dans le plan horizontal qui passe par son centre, et a son milieu peu éloigné du plan mobile, les deux parties du cercle séparées par un diamètre parallèle à l'axe de rotation éprouvent des actions différentes; et en supposant le barreau plus loin de l'axe de rotation que le centre du cercle, l'effet produit sur la demi-circonférence voisine du barreau l'emportera sur l'autre à cause de la proximité et de la longueur du bras de levier : alors, lorsqu'il y aura répulsion, l'équilibre sera stable; et quand il y aura attraction, le cercle se mouvra dans le sens du plus petit segment.

1091. *Rotation d'un conducteur autour d'un aimant.* Cette expérience se fait au moyen de l'appareil fig. 691. MN est un vase

métallique annulaire plein d'eau acidulée, dont l'orifice central est occupé par le pôle d'un aimant; sur les bords de cet orifice s'élève une tige en verre *ab*, terminée par un godet dans lequel repose la pointe *sa* d'un conducteur *cdef*, dont les extrémités inférieures sont soudées à un anneau de cuivre qui plonge dans le liquide; au-dessus de la pointe *sa*, le conducteur mobile porte une petite capsule pleine de mercure, dans laquelle plonge un fil qui communique avec une des extrémités de la pile; l'autre communique avec le vase annulaire. Aussitôt que le courant traverse le fil conducteur, le fil tourne autour de l'aimant d'une manière continue; si le courant est ascendant dans le conducteur et le pôle austral en haut, le mouvement de rotation a lieu de l'est à l'ouest par le midi; si on renverse l'aimant, le mouvement a lieu en sens contraire; si on place l'aimant au-dessus de la coupe *s*, le pôle boréal en dessus, le mouvement a encore lieu de l'est à l'ouest par le midi. Cette expérience peut être faite sans pile en construisant le vase MN en zinc. L'appareil peut être disposé d'une manière différente (fig. 998) : ABC est un aimant en fer à cheval; chaque branche traverse un godet de bois rempli de mercure, mais elle est isolée sur toutes les parties touchées par ce métal. L'inspection de la figure fait voir que cette nouvelle disposition ne diffère de la première que par l'arrangement des parties.

On explique facilement ce phénomène en considérant l'aimant comme renfermant des courants circulaires perpendiculaires à son axe, car alors les circonstances sont les mêmes que celles de l'expérience dans laquelle un conducteur fini tourne autour d'un courant circulaire; ou, en considérant les actions d'un pôle de l'aimant sur tous les éléments des courants mobiles, car les forces qui résultent de ces actions sont horizontales, parallèles entre elles et à la circonférence du cercle décrit, et tendent toujours à faire tourner le conducteur dans le même sens.

1092. *Rotation d'un conducteur autour de son axe produite par un aimant.* Pour effectuer cette rotation, on emploie l'appareil fig. 682 : FL est un support en verre ou en bois, à l'extrémité duquel se trouve une tige horizontale en cuivre LK, terminée par la boîte K, destinée à tenir l'aimant *cc* suspendu; sa partie inférieure se termine par une pointe qui plonge dans le godet *d* d'une tige de cuivre *mn* lestée par un prolongement en platine, et flottant dans du mercure qui remplit le vase MN; l'extrémité supérieure *c* de l'aimant communique avec un pôle de la pile, et le mercure avec

l'autre. On rend le mouvement de rotation plus rapide en remplaçant le conducteur par un tube de cuivre : la masse du conducteur étant alors beaucoup diminuée, celle du contre-poids l'est également. Pour concevoir la cause de ce mouvement, il faut remarquer que le conducteur ne doit point être considéré comme conduisant l'électricité par une droite sans épaisseur, mais comme renfermant autant de courants qu'il contient de files de molécules parallèles à son axe. Ainsi, cette expérience rentre exactement dans la précédente.

1093. *Rotation du mercure produite par un aimant.* Si on plonge dans un bain de mercure, perpendiculairement à sa surface, deux fils de cuivre communiquant avec les pôles d'une pile très-puissante, et si on approche le pôle d'un aimant, soit au-dessus, soit au-dessous d'un des fils, le mercure tourne autour d'eux comme axes, suivant les circonstances ordinaires des rotations électro-magnétiques, et avec une vitesse qui augmente considérablement, lorsqu'on fait agir simultanément les pôles opposés de deux aimants, l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la surface. Quand le pôle de l'aimant est placé au-dessus de la surface du mercure, entre les deux fils, le mouvement circulaire cesse, et il s'établit dans le liquide deux courants opposés, l'un à droite, l'autre à gauche de l'aimant. Cette expérience peut être faite d'une autre manière qui présente des phénomènes plus singuliers.

On prend deux fils de cuivre (fig. 683) dont les extrémités soient planes et polies, et, après les avoir recouverts d'une matière isolante dans toute leur longueur, on les fait passer à travers deux ouvertures pratiquées dans le fond d'un vase de verre, de manière que leurs extrémités s'élèvent à la même hauteur; on remplit alors le vase de mercure de manière à couvrir les extrémités des tiges, et on les met par leurs parties inférieures en contact avec les pôles d'une pile. Aussitôt que le circuit est fermé, le mercure s'élève au-dessus des extrémités des tiges, d'où s'échappent des ondes dans toutes les directions. En approchant le pôle d'un aimant, le sommet du cône s'abaisse; à une plus petite distance la surface du mercure devient plane, et le mouvement de rotation du métal commence à s'effectuer; à une distance plus petite encore le mercure est déprimé. L'étain en fusion se comporte de la même manière.

Ces mouvements rentrent évidemment dans la classe des mouvements de rotation des courants finis produits par les courants circulaires. On peut les expliquer de la même manière; ou bien en con-

sidérant que l'action exercée par le pôle d'un aimant sur un élément de courant est perpendiculaire au plan qui passe par l'élément de courant et le pôle.

1094. *Rotation d'un aimant autour de son axe.* La fig. 683 A représente la disposition de l'appareil. AB est un aimant lesté par un appendice en platine BC, et garni à sa partie supérieure d'un godet plein de mercure; l'aimant est placé dans un vase M rempli de mercure, qui renferme à la hauteur du niveau du mercure un anneau métallique d'un diamètre peu différent de celui du vase, et qui communique avec un des pôles d'une pile; l'autre est mis en communication avec la capsule qui termine l'aimant. Aussitôt que le circuit est fermé, l'aimant tourne rapidement sur lui-même, dans le sens déterminé par l'action des courants qui s'établissent à la surface du mercure, sur le pôle voisin. Dans la disposition de l'appareil, il semble que les courants forment des circuits fermés fixes, que, par conséquent, la résultante totale doit passer par le pôle de l'aimant, et que par suite la rotation est impossible; mais il faut remarquer que la partie du circuit qui passe à travers l'aimant est sans action sur lui : car les actions réciproques qui s'exercent entre les molécules d'un même corps ne peuvent lui imprimer aucun mouvement. Ainsi, le circuit est réellement terminé aux points où il entre et où il sort de l'aimant : par conséquent, la résultante totale est nécessairement en dehors de l'aimant. L'aimant tourne, parce qu'il est toujours disposé de la même manière par rapport aux courants qui agissent sur lui; et le sens du mouvement peut être déterminé ou par l'action des courants extérieurs qui rayonnent dans le mercure (fig. 684), ou en considérant l'action de la partie du courant qui passe à travers l'aimant : car, si cette partie traversait l'aimant sans être liée avec lui, son action devrait être égale et opposée à celle du reste du circuit, puisque l'action totale du circuit fermé doit être nulle : ainsi la rotation sera opposée à celle qu'on déduirait de l'action des courants qui traversent l'aimant.

Dans le cas dont il s'agit, il est très-facile de calculer le moment de rotation : en effet, nous avons vu précédemment que, quand un courant $L_1 L_2$ (fig. 685) était sollicité par un pôle d'un aimant, le moment de rotation était $FC(\cos\theta_2 - \cos\theta)$; le moment relatif à l'autre pôle serait de même $FC(\cos\theta'_2 - \cos\theta'_1)$; et, comme les actions des deux pôles sont contraires, le moment total de rotation du courant autour de la ligne des pôles sera

$$FC(\cos\theta_2 - \cos\theta_1 - \cos\theta'_2 + \cos\theta'_1) :$$

le moment de rotation est donc indépendant de la forme et de la grandeur du courant $L_1 L_2$, et ne dépend que de la position de ses extrémités.

Il est facile de voir, d'après cela, que l'action serait nulle si le circuit était fermé (fig. 686) : car alors les points L_1 et L_2 coïncideraient, et on aurait $\theta_1 = \theta_2$ et $\theta'_1 = \theta'_2$, ce qui réduirait à zéro le moment de rotation.

Il en serait de même si le courant aboutissait à l'axe de l'aimant (fig. 687) : car alors on aurait $\theta_1 = 0$, $\theta'_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$, $\theta'_2 = \pi$, ce qui donnerait $\cos\theta_1 = 1$, $\cos\theta'_1 = 1$, $\cos\theta_2 = -1$, et $\cos\theta'_2 = -1$, et par conséquent zéro pour le moment de rotation.

Mais, si le courant traversait l'aimant dans des points situés hors de l'axe, la partie du courant qui se trouverait dans l'aimant ne pourrait exercer aucune action sur lui, et le reste du circuit tendrait à faire tourner l'aimant.

Si le point L_1 était seul sur le prolongement de l'axe, on aurait $\theta_1 = 0$, $\theta'_1 = 0$: par conséquent, le moment se réduirait à

$$FC(\cos\theta_2 - \cos\theta'_2).$$

Tant que le point L_2 (fig. 685) est au-dessus du plan horizontal passant par le point A, le moment ne renferme que la différence des cosinus, et il devient très-petit, quand le point L_2 est très-voisin de l'axe.

Quand le point L_2 est dans le plan horizontal mené par le point A, $\cos\theta_2 = 0$, et le moment se réduit à $-FC\cos\theta'_2$.

Quand le point L_2 tombe entre ce plan horizontal et celui qui passe par le point B, $\cos\theta_2$ devient négatif, et le moment se réduit à

$$-FC(\cos\theta_2 + \cos\theta'_2).$$

Il est facile de voir que quand le point L_2, restant à la même hauteur, se rapprochera de l'aimant, le moment augmentera, et qu'en supposant qu'il reste à la même distance et qu'il s'abaisse, le moment atteindra son maximum quand il sera au milieu de l'aimant, et que les valeurs du moment restent les mêmes quand L_2 est à égale distance du milieu, au-dessus ou au-dessous. Quand le point L_2 est au milieu de l'aimant, la valeur du moment devient $-2FC\cos\theta'_2$, dont la valeur absolue est d'autant plus grande que le point L_2 est plus voisin de l'axe.

Il résulte évidemment de la valeur du moment, que le sens de la rotation reste le même quelle que soit la position du point L_2, et qu'elle devient très-petite quand il est au-dessous de l'aimant et qu'il est très-voisin de l'axe.

Si on voulait terminer le courant à l'axe de l'aimant, et à une distance de son axe plus grande que son rayon, il faudrait employer la disposition fig. 688, dans laquelle L_2 représente une rigole annulaire pleine de mercure et fixée à l'aimant : la partie efficace du courant serait évidemment terminée aux points L_1 et L_2. Avec deux rigoles on limiterait le courant à des hauteurs et des distances quelconques de l'aimant (Ampère).

1095. *Rotation d'un aimant autour d'un conducteur parallèle à son axe.* On emploie la même disposition que précédemment; seulement on fait arriver le courant dans le mercure par une tige centrale MN (fig. 689) : aussitôt que le circuit est fermé, l'aimant tourne autour du conducteur MN. Pour expliquer ces mouvements,

considérons les courants qui rayonnent à la surface du mercure (fig. 690), et occupons-nous d'abord des deux courants tangents PA et PA′. Le courant PA′ attire la partie de chacun des courants de l'aimant qui tourne sa convexité vers ce courant, puisque le mouvement de l'électricité y a lieu dans le même sens, et il repousse les parties des autres éléments de courants, mais avec une moindre intensité, parce qu'ils en sont plus éloignés; au contraire, le courant PA repousse les éléments des courants de l'aimant les plus voisins, et attire les autres. Or, l'action attractive du premier courant est dirigée suivant O*m′*, et l'action répulsive du second est dirigée suivant O*m* : par conséquent la résultante totale de ces deux forces sera dirigée suivant TT′, perpendiculaire à OP, et tendra à faire mouvoir l'aimant dans le sens OT′. Si on prend deux autres courants PB et PB′, symétriquement placés par rapport au courant passant par le centre de l'aimant, les mêmes raisonnements feront voir que la résultante de leur action sera également dirigée suivant OT′. Quant aux courants qui traversent l'aimant, on peut les partager chacun en trois parties : l'une du point P à l'aimant, la seconde dans l'interieur de l'aimant, la troisième depuis l'aimant jusqu'à l'anneau *efd*. La seconde partie sera sans effet, parce qu'elle ne produira que des attractions et des répulsions réciproques entre les particules de l'aimant, et que de pareilles forces ne peuvent lui imprimer aucun mouvement; mais en examinant les actions de la première et de la dernière partie dans deux courants symétriquement placés par rapport au courant PO, on trouve que la résultante totale de ces actions est dirigée suivant OT′. Ainsi les actions de tous les courants qui traversent le mercure concourent à faire tourner l'aimant autour du point P dans le sens OT′. L'aimant est en outre soumis à l'action du courant vertical MN, qui tend à le faire tourner sur lui-même; mais, comme cette action est très-faible, le frottement s'oppose souvent à ce qu'elle produise un effet appréciable.

On a fait à cette explication, dans le cas où la surface de l'aimant est couverte de vernis, une objection qu'il est important de prévenir. Si l'aimant était couvert de vernis, les courants ne le traverseraient pas, et tous les courants établis dans le mercure et ceux qui parcourent le reste du circuit formeraient des circuits fermés : or, nous savons que la résultante totale d'un circuit fermé sur le pôle d'un aimant passe par ce pôle; et Ampère a démontré que la rotation continue d'un aimant par un circuit fixe et fermé n'étaient pas possible, attendu qu'il y avait toujours une position de l'aimant pour

laquelle la résultante coupait l'axe de rotation, et par conséquent que l'effet du circuit fermé se bornait à amener l'aimant dans une position fixe. Mais il faut remarquer qu'ici l'aimant, en marchant vers la posisition d'équilibre qui résulte de l'action du circuit, le déplace continuellement, en supprimant des courants dans des parties de la surface du mercure où il en existait, et en établissant des courants dans des parties qui en étaient dépourvues : par conséquent, le circuit total, quoique fixe en apparence, se meut avec l'aimant, et, la position d'équilibre se déplaçant en même temps, on conçoit alors que la rotation continue devient possible, et qu'elle sera déterminée par l'action des parties voisines, qui sont toujours plus efficaces que les parties éloignées, quand il n'y a pas équilibre.

Il résulte de cette explication que, si l'aimant ne plongeait pas dans le mercure, il ne tournerait pas. C'est ce qui a été vérifié par Ampère : en suspendant l'aimant au-dessus du mercure par un fil de soie très-fin, et faisant arriver le courant par un fil de cuivre qui traverse le mercure de bas en haut et qui est environné de résine, les courants rayonnants s'établissent sur le mercure, le mercure tourne, mais l'aimant reste immobile. Le premier effet paraît singulier, car il semble que l'aimant ne doit pas faire tourner le mercure sans que l'aimant éprouve une réaction, qui tende à le faire tourner en sens contraire. Cela est vrai ; mais, le reste du circuit tendant à le faire tourner en sens opposé, il reste immobile ; il n'en est pas ainsi du circuit, attendu que les deux parties, qui tendent à se mouvoir en sens contraire, ne sont pas solidaires. Une expérience très-facile à vérifier rend bien évident le fait dont il est question : on prend un anneau de bois épais et on enroule autour un fil de cuivre, de manière à former une hélice circulaire (fig. 691) ; on place cette hélice horizontalement, et on suspend au-dessus, par un fil de soie, une aiguille aimantée ayant les mêmes pôles aux extrémités et, par conséquent, un point conséquent au milieu : en faisant passer un courant par le fil, dans chaque position de l'aiguille elle est soumise à des courants qui ont la même position, et cependant elle ne tourne pas.

1096. *Aimantation des aiguilles d'acier par les courants.* L'action qui existe entre un courant électrique et une aiguille aimantée, devait faire présumer que les courants doivent développer du magnétisme dans les corps qui sont susceptibles d'acquérir cette singulière propriété. M. Arago reconnut le premier que, si on mettait un conducteur en contact avec de la limaille de fer, elle s'attachait

à lui comme à un aimant, mais qu'à l'instant où le courant cessait de passer à travers le conducteur, la limaille, obéissant à la pesanteur, s'en détachait. Ainsi la limaille avait été aimantée; mais elle ne conservait son magnétisme que sous l'influence de la cause qui l'avait développée : le courant se comportait alors comme un aimant. Il y a cependant une différence très-remarquable entre la manière dont la limaille s'attache à un conducteur et à un aimant : sur le conducteur les parcelles de limaille sont appliquées par leurs milieux et transversalement, tandis que sur l'aimant elles sont fixées normalement dans le sens de leur plus grande dimension, et forment une masse hérissée. Pour concevoir la cause de cette différence, il faut remarquer que, par l'action d'un conducteur et d'un aimant, chaque parcelle de limaille devient un petit aimant; mais, quand ces parcelles sont soumises à l'action d'un aimant, chaque pôle de l'aimant attire un des pôles de la limaille et repousse l'autre; tandis que, quand la limaille est soumise à l'action d'un courant, il attire ou repousse les deux pôles suivant leur position par rapport à la direction du courant : alors, dans ce dernier cas, les parcelles de limaille doivent se diriger perpendiculairement au conducteur, de manière que le pôle austral soit à gauche du courant, et elles doivent s'y appliquer par leur milieu.

Plus tard on reconnut que des aiguilles d'acier acquéraient des pôles quand elles étaient dans le voisinage d'un courant, et souvent même jusqu'à saturation, lorsque leur direction était perpendiculaire à celle du courant, qu'elles avaient de petites dimensions et que le courant était assez fort. D'après cela, il est évident qu'en entourant l'aiguille d'une série de petits cercles (fig. 692), dans lesquels on ferait passer un courant électrique dans le même sens, on devait obtenir un plus grand développement de magnétisme. C'est en effet ce qui a été reconnu par M. Arago, en employant un fil de cuivre tourné en hélice autour d'un tube de verre ou de carton, dans l'intérieur duquel on place l'aiguille.

1097. Ce phénomène fournit une vérification très-remarquable de l'hypothèse d'Ampère sur la constitution des aimants : car nous allons voir que la position des pôles et celle des points conséquents qui se forment dans certaines circonstances sont parfaitement d'accord avec la théorie de ce savant physicien.

Avant d'étudier la nature des pôles formés dans une aiguille d'acier placée dans un conducteur contourné en hélice, il est nécessaire d'établir une distinction importante sur les deux espèces d'hé-

lices qui peuvent être formées. Concevons un tube horizontal sur lequel on enroule un fil de cuivre, en commençant par la partie du tube la plus voisine et s'éloignant continuellement : l'enroulement peut avoir lieu de gauche à droite en dessus, ou de gauche à droite en dessous (fig. 693 et 694). On obtient ainsi deux espèces d'hélices symétriques qui ne peuvent jamais coïncider, et que l'on désigne sous les noms de *dextrorsum* et de *sinistrorsum;* les tire-bouchons et toutes les vis sont dextrorsum.

Lorsqu'on emploie une hélice dextrorsum, le pôle boréal de l'aiguille est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant. Dans la théorie d'Ampère la raison en est facile à saisir : car alors, de quelque côté que le courant pénètre, il est disposé comme ceux qui existent dans un aimant parallèle dont le pôle boréal serait du côté où entre le courant. Au contraire, si on prend une hélice sinistrorsum, les courants circulaires seront disposés comme ils le sont dans une aiguille aimantée parallèle, dans laquelle le pôle boréal serait du côté opposé à l'entrée du courant. Si on enroule le fil de manière qu'il forme successivement des hélices dextrorsum et sinistrorsum (fig. 695), il se forme un point conséquent à chaque changement de direction du fil. Ce dernier fait est encore une conséquence évidente de la théorie d'Ampère.

Mais, si l'on fait passer le courant à travers une aiguille déjà aimantée et dans le sens de sa longueur, la puissance magnétique de l'aiguille est toujours diminuée, et elle disparaît complétement si l'aiguille n'a que de petites dimensions et si le courant est assez énergique, parce que le courant tend à donner aux axes magnétiques des éléments une direction perpendiculaire à celle qu'ils ont.

1098. *Aimantation du fer doux par les courants.* Le fer doux, sous l'influence des courants électriques, acquiert la puissance magnétique à un très-haut degré. Pour produire cette aimantation on emploie des barres de fer doux droites ou courbées en fer à cheval, et autour desquelles on enroule un fil de cuivre, de manière que les spires ne soient en communication métallique ni entre elles, ni avec le barreau; quand la pile n'a qu'un seul élément ou n'en a qu'un très-petit nombre, on se sert d'un très-gros fil ayant par exemple 3 à 5 millimètres de diamètre; on colle plusieurs feuilles de papier sur le barreau, et on enroule le fil de cuivre de manière que les spires ne se touchent pas; quand, au contraire, la pile a un grand nombre d'éléments, on emploie des fils plus fins, très-longs, recouverts de soie, qu'on enroule autour des barreaux; dans tous les

cas il faut employer des barreaux ayant un très-grand diamètre, attendu que l'influence de ce diamètre est beaucoup plus grande que celle de l'intensité du courant. Nous rapporterons seulement deux expériences qui feront juger de la puissance magnétique développée. Un fer à cheval de 51 millimètres de diamètre, couvert de soie et de deux hélices nues de 5 millimètres de diamètre, a supporté 37 kilogrammes avec un élément de 70 centimètres carrés (M. Moll). Un fer à cheval de 7 centimètres de diamètre, entouré d'un fil de fer de 1300 mètres de longueur, a porté 450 kilogrammes avec une pile d'un grand nombre d'éléments. On a reconnu que le plus grand effet a lieu à l'instant où l'on ferme le circuit; que pour des fils gros et courts le nombre des éléments est sans influence; que quand on change la direction du courant le changement des pôles a lieu instantanément; et enfin que quand le courant cesse, sous l'influence de l'armature une grande partie de l'aimantation subsiste. Un fer à cheval qui portait 60 kilogrammes soutint encore $25^k,5$ pendant plusieurs semaines après la cessation du courant; mais tout le magnétisme disparaissait à l'instant de la séparation de l'armature (M. Watkins).

1099. Les gros barreaux d'acier trempés ou recuits ne s'aimantent que faiblement sous l'influence des courants; mais en se servant de barreaux de fer aimantés par des courants, et de la méthode de la double touche, on les aimante facilement, parce que, pour vaincre la force coercitive, il faut non-seulement de grandes puissances magnétiques, mais encore le mode d'ébranlement qui est produit par la friction.

Il est probable qu'on parviendrait aussi à aimanter les gros barreaux d'acier, en mettant leurs extrémités en contact avec les pôles opposés de deux puissants électro-aimants, et ébranlant l'acier par des chocs brusques et rapides exercés aux extrémités des barreaux de fer aimantés sous l'influence du courant.

On peut aussi communiquer à des barreaux d'acier un magnétisme intense et permanent, en les mettant en contact à la chaleur rouge avec un fer à cheval en fer doux, aimanté par des courants, et plongeant le barreau d'acier dans l'eau. La trempe ayant lieu lorsque le barreau est fortement magnétique, cet état subsiste après la trempe (Ami).

1100. *Instruments destinés à mesurer l'intensité des courants.* Les instruments dont il est question sont généralement désignés sous le nom de *galvanomètres*. Cette désignation impropre, a en outre

l'inconvénient de rappeler le nom de Galvani à propos de phénomènes dont il n'a fait que provoquer la découverte. Le seul nom convenable est celui de *rhéomètres*, mesure de courants : c'est celui que nous emploierons désormais.

Le rhéomètre le plus simple consiste en une boussole au-dessus de laquelle se trouve un fil métallique fixe, dirigé dans le méridien magnétique, et à travers lequel on fait passer les courants dont on veut mesurer l'intensité. L'aiguille sera d'autant plus déviée que le courant sera plus énergique, et la limite d'écart sera évidemment 90°. Il résulte de la formule [1086] que, pour un même courant, la déviation est indépendante de l'intensité magnétique de l'aiguille, qu'elle diminue avec sa longueur, et que, pour une même aiguille et un même courant, la déviation varie avec la plus courte distance du courant à l'aiguille, de manière qu'il existe un maximum à une distance finie; c'est ce qu'on peut d'ailleurs vérifier en éloignant progressivement et dans le même plan vertical le fil de l'aiguille : la déviation augmente jusqu'à une certaine distance, au delà de laquelle elle diminue. Cet effet singulier résulte de ce que l'action exercée sur l'aiguille est perpendiculaire à la plus courte distance du pôle de l'aiguille au fil, et que cette résultante s'incline sur le plan que parcourt l'aiguille, d'autant plus que le fil s'éloigne davantage, circonstance qui, jusqu'à une certaine limite, augmente plus la composante horizontale qu'elle n'est diminuée par l'accroissement de la distance. On pourrait déduire l'intensité des courants de la déviation au moyen de la formule citée. Il faudrait, pour cela, par des expériences préliminaires faites sur des courants dont les intensités relatives seraient connues, trouver les valeurs des constantes qu'elle renferme; mais ce mode de détermination de l'intensité des courants ne serait pas commode, la formule étant assez compliquée.

On dispose toujours les appareils de manière à obtenir le rapport des intensités des courants par une opération facile à exécuter.

L'aiguille étant suspendue à un fil métallique élastique, si on ramenait l'aiguille dans le méridien mangétique par la torsion du fil, les intensités des courants seraient évidemment proportionnelles aux angles de torsion.

On pourrait aussi suspendre l'aiguille sur une pointe ou à un fil de soie, et faire mouvoir le courant de manière qu'il fît toujours le même angle avec l'aiguille : les intensités seraient alors pro-

portionnelles aux sinus des angles de déviation de l'aiguille sur le méridien magnétique.

L'appareil pourrait être disposé de manière que les intensités des courants fussent proportionnelles aux tangentes des déviations; il suffirait, pour cela, de placer l'aiguille très-près d'une large rangée de fils parallèles parcourus successivement par le courant, car alors l'action exercée sur l'aiguille serait toujours la même, et il est facile de voir que, dans l'état d'équilibre, les forces sont dans le rapport énoncé.

Les fils parallèles pourraient être remplacés par une plaque mince d'une épaisseur uniforme, terminée par deux bords parallèles, ayant une longueur égale à cinq ou six fois celle de l'aiguille, et une largeur trois ou quatre fois plus grande. Le courant, en traversant la lame mince, se répartirait également dans toute son étendue, comme nous le verrons plus loin, et le courant pourait alors être considéré comme formé d'une infinité de courants égaux et parallèles.

En désignant par f l'intensité magnétique de l'aiguille, par F celle de la terre, par Q l'intensité du courant, et par φ la déviation, la force directrice de l'aiguille sera $Ff \sin \varphi$; et, la force résultant de l'action du courant sur l'aiguille étant appliquée au pôle de l'aiguille, et perpendiculairement à la direction du courant, la composante (fig. 696) perpendiculaire à la direction de l'aiguille sera $Qf \cos \varphi$: on aura donc

$$Ff \sin \varphi = Qf \cos \varphi; \quad \text{d'où} \quad Q = F \operatorname{tang} \varphi.$$

Cette relation suppose cependant que l'action des courants qui parcourent les fils extrêmes ou les bords de la plaque est sensiblement nulle, ce qui n'existe pas; mais, quand le faisceau ou la plaque a une largeur trois ou quatre fois plus grande que la longueur de l'aiguille, et que l'aiguille en est très-rapprochée, l'influence des courants extrêmes est sensiblement nulle.

L'une quelconque de ces dispositions pourrait alors servir à trouver, une fois pour toutes, les intensités correspondantes aux déviations d'un rhéomètre dont l'aiguille serait suspendue par un fil de soie ou sur une pointe, et dont le conducteur serait fixe : il suffirait, pour cela, de faire passer simultanément des courants de différentes intensités à travers les deux instruments. On obtiendrait ainsi des points de la courbe dont les abscisses et les ordonnées représenteraient les uns les déviations, les autres les intensités : il serait donc facile de tracer cette courbe et de faire une table représentant les intensités correspondantes aux déviations.

Les boussoles à sinus et à tangentes ont été employées pour la première fois par M. Pouillet; mais la dernière n'est pas disposée comme nous l'avons dit : elle consiste en un grand cercle de cuivre vertical à gorge, autour duquel est enroulé un ruban de cuivre recouvert de soie, dont les extrémités communiquent avec la pile. Au centre du cercle se trouve une petite aiguille aimantée, fixée à angle droit sur une aiguille en cuivre, dont les extrémités parcourent un cercle horizontal divisé; tous les éléments du courant étant à une grande distance de l'aiguille agissent sensiblement de la même manière et dans la même direction sur l'aiguille, quelle que soit sa position; mais l'intensité de l'action est en raison inverse du rayon du cercle. Cette condition conduit évidemment à la formule précédente. En remplaçant la petite aiguille par une plus longue; et en faisant mouvoir le cercle, cet instrument peut être transformé en une boussole à sinus.

Les figures 999 et 1000 représentent un rhéomètre à tangentes disposé de la manière la plus simple. *abcdef* est une boîte carrée ou circulaire, en cuivre ou en bois, percée au fond d'une ouverture circulaire de $0^m,05$ de diamètre, et soutenue par trois petits pieds à vis; au-dessous de la boîte se trouve une plaque de cuivre ABCD de $0^m,25$ de longueur, sur $0^m,08$ de largeur, $0^m,005$ d'épaisseur, et terminée à chaque bout par un petit godet de cuivre rempli de mercure, dans lequel plongent les fils polaires de la pile; elle est soutenue par des crochets fixés au-dessous de la boîte, et isolée par de la soie sur tous les points qui sont en contact avec eux ou avec la boîte. Au centre de la plaque ABCD est fixée une pointe aiguë en acier trempé, surmontée d'une chape sur laquelle reposent une aiguille courte très-voisine de la plaque et une longue aiguille de cuivre dont les extrémités parcourent un cadran fixé au fond de la boîte. Enfin, la boîte est fermée par une lame de verre. On pourra rendre l'appareil plus sensible en plaçant sur la chape deux aiguilles sensiblement égales pour la forme, l'état magnétique, et placées en sens contraire. Dans ce cas, il vaudrait mieux se servir de la disposition de la figure 1101 dans laquelle le système des aiguilles est suspendu à un fil de cocon fixé à la partie supérieure d'un cylindre de verre, fixé lui-même au centre de la plaque de verre qui ferme la boîte.

Pour transformer un de ces appareils en rhéomètre à sinus, il suffirait de remplacer la plaque ABCD par un gros fil de cuivre, terminé de même par deux godets remplis de mercure, traversé à son centre

par une petite tige métallique, autour de laquelle il puisse tourner; cette tige serait soutenue par des barres fixées aux supports de la boîte; la tige de cuivre devrait avoir une longueur telle qu'elle pût tourner entre les supports; un petit appendice soudé à la tige indiquerait sa position sur le cadran; au-dessous de son centre se trouverait un bouton qui servirait à le faire mouvoir.

1101. Les appareils que nous venons de décrire ne sont pas d'une grande sensibilité et, par conséquent, ne pourraient pas être employés pour des courants très-faibles. On peut l'augmenter beaucoup en employant deux aiguilles formant un système à peu près astatique (fig. 697), mais assez écartées l'une de l'autre pour que l'on puisse négliger l'action du courant sur celle qui est la plus éloignée. Mais on obtient une sensibilité beaucoup plus grande encore en ajoutant à ce moyen une disposition due à Schweiger, et qui consiste à tourner plusieurs fois le fil autour de l'aiguille inférieure (fig. 697 A) : toutes les parties du circuit concourent à faire dévier l'aiguille dans le même sens. C'est ce qu'il est facile de déduire de ce qui précède. On conçoit alors que, si l'allongement du fil ne diminuait pas l'intensité du courant qui le traverse, en augmentant le nombre des circonvolutions du fil, et en les isolant de manière que le courant soit toujours obligé de parcourir le fil dans toute sa longueur, on pourrait augmenter indéfiniment la sensibilité des appareils, mais il n'en est pas ainsi. Pour certaines espèces de courants, l'influence de l'accroissement de longueur du circuit est faible, du moins jusqu'à une certaine limite; pour d'autres, au contraire, elle est très-grande; et, comme à mesure que les circonvolutions se multiplient, elles s'éloignent nécessairement de l'aiguille, les courants qui les parcourent ont une influence décroissante. Il résulte de ces deux circonstances qu'il doit exister pour chaque espèce de courants un nombre de circonvolutions, qui donne le maximum de déviation. On emploie toujours des fils de cuivre rouge, recouverts de soie sur toute leur étendue, et on étale les circonvolutions de manière que les fils forment des faisceaux ayant à peu près pour largeur la longueur de l'aiguille. Quand les courants proviennent de l'action des corps solides sur un liquide, et que pour cette raison on désigne sous le nom d'*hydro-électriques*, on emploie ordinairement des rhéomètres à 4 ou 600 tours formés d'un fil de cuivre de 1/3 de millimètre de diamètre. Pour les courants provenant de la chaleur, que nous décrirons bientôt et qu'on désigne sous le nom de *thermo-électriques*, on emploie des

appareils d'un plus petit nombre de tours formés de fils de cuivre d'un plus grand diamètre; enfin, pour les courants provenant de l'électricité à grande tension, celle des machines électriques ordinaires, on se sert de rhéomètres à fils très-fins, doublement recouverts de soie, de vernis à la gomme laque, et qui ont jusqu'à 2,000 et 3,000 tours. Dans tous les cas, on enroule les fils sur un cadre en cuivre ou en bois, d'une manière régulière, et on pratique sur la couche supérieure des fils, et au milieu, en les écartant, un orifice allongé, par lequel on introduit l'aiguille qui doit se trouver au centre des circonvolutions. Il est plus avantageux d'étaler les fils sur une grande largeur que de les ramasser dans une petite étendue, parce que les déviations croissent alors suivant une loi moins rapide. Il est même facile de voir, d'après ce que nous avons dit précédemment, que, si l'aiguille était plus petite que la largeur et la longueur des couches de fils, les déviations devraient suivre sensiblement la loi des tangentes, comme dans les rhéomètres simples à plaques. L'aiguille supérieure est également dirigée par les courants; mais elle ne se déplace que par la différence des actions qu'elle éprouve de la part des couches supérieures et inférieures des fils; et, comme l'action des fils voisins l'emporte sur celle des autres, cette aiguille est déviée dans le même sens que l'aiguille intérieure.

On place ordinairement le cadran sur une plaque de cuivre rouge fixée au-dessus du faisceau, au-dessous et très-près de l'aiguille supérieure; cette plaque est percée d'une fente parallèle à l'ouverture, pratiquée dans la couche supérieure des fils, qui permet l'introduction de l'aiguille inférieure au centre des circonvolutions. La plaque de cuivre a pour objet d'anéantir très-rapidement les oscillations du système des aiguilles [847] : sans cette disposition, l'aiguille reste longtemps avant de se fixer, ce qui est toujours un grand inconvénient. Lorsque l'instrument doit avoir une très-grande sensibilité, il faut que le système des deux aiguilles soit aussi astatique que possible; pour cela, on aimante à saturation des aiguilles égales, on les fait osciller séparément, et on accouple celles qui font sensiblement le même nombre d'oscillations. On emploie, pour suspendre les aiguilles, des fils de cocon simples, décreusés dans de l'eau de savon, afin de rendre presque nulle leur force de torsion. Il faut aussi essayer d'avance si les fils de cuivre sont eux-mêmes magnétiques, et n'employer que ceux qui n'agissent pas sensiblement sur une aiguille astatique : car autrement l'aiguille du

rhéomètre peut prendre deux positions d'équilibre, une de chaque côté du zéro de la division, et qui proviennent de l'action magnétique des faisceaux de fils placés à droite et à gauche (Nobili). Il est probable que cette action magnétique du cuivre provient du fer allié à ce métal, car on rencontre des morceaux de cuivre qui ne sont nullement magnétiques.

Les rhéomètres multiplicateurs peuvent être disposés de manière à donner la mesure de l'intensité des courants par la torsion ou la déviation du système des fils, comme dans les rhéomètres simples. On peut aussi former une table des intensités correspondantes aux différentes déviations, en faisant passer successivement des courants dans un rhéomètre à torsion, à sinus ou à tangentes et un instrument ordinaire [1100]; mais la méthode la plus commode sera exposée lorsqu'il sera question des courants thermo-électriques.

La fig. 698 représente un rhéomètre multiplicateur disposé de la manière la plus simple; d'après ce que nous avons dit, l'inspection seule de la figure suffit pour en faire comprendre la disposition. La fig. 699 représente un rhéomètre multiplicateur destiné à mesurer les intensités des courants en établissant une déviation constante de l'aiguille sur la direction des fils, c'est-à-dire un rhéomètre a sinus; le cadran *ab* est fixé sur le système des fils, et celui-ci repose sur une pièce *mnpq*, qu'on peut faire tourner sur elle-même et qui est traversée par les extrémités du fil; une aiguille *fd*, soudée au support *gh*, sert à mesurer la déviation du système des fils sur sa position primitive, et la pince *ik*, mobile autour de la charnière *k*, sert à fixer le système des aiguilles quand on transporte l'instrument.

1102. Les rhéomètres destinés aux courants d'une faible intensité, tels que nous venons de les décrire, ont plusieurs inconvénients: 1° les fils de cuivre dont on se sert n'étant presque jamais dépourvus d'action magnétique, et le faisceau du fil étant divisé en deux parties, l'aiguille peut avoir une position d'équilibre au-dessus de chacun des deux faisceaux de fil; 2° les deux aiguilles ayant leurs pôles opposés, l'action de la terre sert d'armature à l'une d'elles, et tend à diminuer l'action magnétique de l'autre: de sorte que la sensibilité de l'instrument diminue avec le temps; 3° les aiguilles n'ayant qu'un petit diamètre, leur état magnétique est fortement influencé par le voisinage d'un aimant d'un corps magnétique, les chocs et les variations de température; 4° enfin les aiguilles font de nom-

breuses oscillations avant de se fixer. J'ai cherché à faire disparaître ces inconvénients, et à obtenir une plus grande sensibilité; j'y suis parvenu par la disposition suivante. La fig. 1002 représente une élévation de l'appareil, la fig. 1003 une coupe verticale, et la fig. 1004 une projection horizontale.

Le fil de cuivre environné de soie est uniformément enroulé sur un cadre en bois, de manière à ne former qu'un seul faisceau. Sur le cadre se trouve une plaque épaisse de cuivre AB, où le cadran est tracé; cette plaque est continue et dépasse la longueur des barreaux. Le cadre est fixé à une douille de cuivre CD, que l'on peut faire tourner sur elle-même, au moyen du bouton FG. La partie mobile de l'appareil est formée de deux barreaux d'acier II, KK, ayant la forme des aiguilles de boussoles, mais de 3 millimètres d'épaisseur; ils sont fixés horizontalement, les pôles contraires en regard, perpendiculairement aux côtés horizontaux d'un cadre en ivoire LMNO, dont le côté inférieur est placé dans l'intérieur du cadre autour duquel le fil est enroulé. Au-dessous du barreau supérieur se trouve une aiguille en cuivre très-mince PQ, dont l'axe de figure est dans le plan vertical des barreaux, et qui indique la déviation. Au-dessus de ce barreau, se trouve une aiguille aimantée RS, mobile autour de son centre, et dans le plan des deux barreaux; un cadran vertical indique l'inclinaison de cette aiguille, et permet de retrouver sa position, quand elle a été dérangée. Le système des deux barreaux, de l'aiguille indicatrice, et de l'aiguille mobile dans un plan vertical, est suspendu, suivant la méthode ordinaire, à un fil de cocon, fixé par l'extrémité supérieure à un crochet que l'on peut faire monter et descendre, au moyen d'une vis qui passe dans un orifice percé dans la cloche de verre qui recouvre l'appareil. Les deux extrémités du fil de cuivre traversent un cylindre de bois placé dans la douille CD, et sont soudés à deux cercles de cuivre TT, UU isolés, et fixés autour de la douille CD; ces deux cercles, de diamètres différents, sont percés, près de leur circonférence, d'un grand nombre de trous destinés à recevoir des cônes de cuivre soudés aux extrémités des fils conducteurs. La projection horizontale de ces cercles est représentée dans la fig. 1005.

Par cette disposition, l'aiguille ne peut avoir qu'un seul point d'arrêt, puisque les fils ne forment qu'un seul faisceau. A la vérité l'angle des déviations est limité; mais cet inconvénient n'en est réellement pas un, car au delà de 40° les intensités croissent si rapidement par rapport aux déviations, qu'on ne peut plus les me-

surer. On peut rendre le système des aiguilles aussi astatique qu'on peut le désirer, en donnant à l'aiguille compensatrice une inclinaison convenable; et l'instrument peut alors servir à des usages qui exigeraient des rhéomètres différents. La plaque de cuivre sur laquelle est fixé le cadran étant continue, agit avec beaucoup plus d'énergie pour éteindre les oscillations, que si elle était percée d'une fente, comme cela a lieu dans tous les rhéomètres. L'aiguille abandonnée à elle-même à une déviation de 50°, est revenue au zéro après 5 oscillations dont les amplitudes ont été de 50°, 17°, 4°, 3° et 0°. Enfin l'appareil peut avoir une sensibilité plus grande que ceux qui renferment de petites aiguilles, parce que la déviation augmente avec leur intensité magnétique, et que cette intensité croît avec la masse. Avec un de ces appareils, j'ai obtenu une déviation de 35°, en établissant une différence de température de 20° dans les soudures d'un circuit composé d'un fil de cuivre de 100 mètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre, et d'un fil de fer de quelques décimètres de longueur.

1103. *Rhéomètre différentiel.* Pour constater de très-petites différences entre deux courants, ou l'inégale résistance de deux corps, M. Becquerel a imaginé d'enrouler sur un même cadre deux fils égaux; il est évident qu'en faisant arriver en sens contraire les deux courants, l'aiguille en sera déviée que par la différence de leurs actions, et qu'ils seront parfaitement égaux si l'aiguille reste immobile. Mais ces instruments présentent de grandes difficultés dans leur construction, et il est presque impossible d'obtenir deux circuits parfaitement identiques. M. Wheatstone a proposé un moyen très-simple pour faire servir un rhéomètre quelconque de rhéomètre différentiel : il suffit, pour cela, de faire arriver dans le fil les deux courants en sens contraire. Pour observer l'inégale résistance de deux fils, il place sur une planche (fig. 1006) quatre fils fixes égaux p, p', n, n', qui communiquent, les deux premiers avec le pôle positif de la pile, les deux derniers avec le pôle négatif, p,n avec une des extrémités du rhéomètre, et p',n', avec l'autre; en interrompant les fils n et n' ou p et p', par des godets pleins de mercure dans lesquels on plonge les extrémités de deux fils l et l', l'aiguille du rhéomètre s'inclinera en vertu de la différence de leur résistance.

§ 5. *Effets calorifiques produits par les courants.*

1104. Les effets que produisent les courants dans un fil métal-

lique qu'ils traversent sont analogues à ceux que nous avons observés, dans les mêmes circonstances, pour les décharges des batteries électriques [949] : suivant la nature et la ténuité des fils, ils s'échauffent, rougissent, fondent, brûlent ou se volatilisent. Si on fixe un fil de platine de 0^{mm}, 5 de diamètre à l'extrémité de l'un des fils polaires d'une pile puissante, et au bout de l'autre un morceau de charbon conducteur, tel que celui qu'on emploie dans les piles de M. Bunsen, en touchant le charbon avec le fil de platine, la chaleur est assez intense pour le fondre. En réunissant les gros fils par des fils d'un plus petit diamètre, s'ils sont très-courts, le maximum de température se trouve au milieu de leur longueur; s'ils sont longs, l'échauffement est le même dans toute la longueur, excepté vers les extrémités : cette dernière circonstance provient de la perte de chaleur par les supports du fil. Si le fil homogène est très-long, l'échauffement reste le même quand une partie du fil est plongée dans l'eau.

Pour produire l'incandescence des fils d'un grand diamètre, il faut des appareils très-puissants; mais, lorsqu'on emploie des fils d'une grande ténuité, de très-petites piles peuvent suffire : avec un couple dont la lame de zinc a 5 à 6 centimètres de largeur sur 10 de hauteur, on peut rendre incandescent un fil de platine de 1/10 de millimètre de diamètre (fig. 700).

Wollaston est même parvenu, avec un seul couple de la dimension d'un dé à coudre, à produire l'incandescence d'un fil de platine d'une finesse extrême, et qu'il obtenait par le procédé suivant : il plaçait un fil de platine dans l'axe d'un moule cylindrique, dans lequel il coulait ensuite de l'argent; en tirant ce cylindre d'argent à la filière, il obtenait un fil très-délié, qui renfermait un fil de platine plus délié encore; en plongeant ce fil dans l'acide nitrique, l'argent était dissous, et il restait un fil de platine à peine visible, dont le diamètre quelquefois n'excédait pas 1/1000 de millimètre. Le même procédé pourrait servir à faire des fils de fer; mais il faudrait se servir de mercure pour dissoudre l'argent.

1105. En employant de très-fortes piles, telles que celle de l'Institution royale de Londres, qui est formée de 2000 couples de 4 pouces de côté, Davy a reconnu que, si l'on fait communiquer avec les pôles de petits cônes de charbon sec, lorsqu'ils sont à une petite distance, la continuité des décharges forme entre les deux pointes un jet de lumière continu, d'un éclat supérieur à celui de toutes les autres lumières, et d'une température si élevée que le

diamant et la plombagine y sont volatilisés; les pointes de charbon peuvent alors être éloignées jusqu'à la distance de 4 pouces, sans que le jet lumineux soit interrompu. Dans l'air raréfié ou dans le vide, ces phénomènes ont encore lieu sensiblement avec la même intensité. Si l'on approche le pôle d'un aimant de l'arc lumineux, l'arc se déforme, puis disparaît.

L'expérience se fait de la manière suivante : on prend un ballon à deux tubulures (fig. 701); une d'elles est garnie d'une boîte à cuir dans laquelle passe une forte tige métallique qui peut s'enfoncer à volonté; l'autre tubulure porte une tige métallique fixe et un robinet; à l'extrémité de chaque tige on attache un petit cône de charbon conducteur; ces cônes doivent être disposés de manière qu'ils touchent les tiges par une grande surface, et que leurs extrémités soient d'abord en contact; on fait le vide dans le ballon; ensuite on fait communiquer les tiges avec une forte pile. Le courant établi, on peut éloigner les cônes, et la lumière devient éblouissante; cette lumière combine le chlore et l'hydrogène, et agit sur le chlorure d'argent comme la lumière solaire.

1106. Ces phénomènes peuvent être reproduits maintenant avec une très-grande facilité en employant les nouvelles piles, et même avec un nombre d'éléments peu considérable. Quand les cônes de charbon sont placés dans le vide, il y a un transport de charbon de la pointe positive à la pointe négative, qui déforme les cônes; s'ils sont placés dans l'air, ils s'usent très-rapidement par leur combustion; mais si les cônes sont formés avec le graphite dur qui se dépose en couches compactes dans l'intérieur des cornues des usines à gaz, leur combustion est très-lente, et on peut facilement disposer l'appareil de manière à rapprocher les cônes à mesure que leur combustion les éloigne. MM. Fizeau et Foucault, à qui on doit cette observation importante, ont comparé la lumière du soleil à celle qui se produit entre deux cônes de charbon traversés par l'électricité provenant d'une pile de Bunsen de 46 éléments doubles; ces deux lumières ont été trouvées dans le rapport de 2,59 à 1. L'expérience a été faite en août et septembre, à deux heures après midi, par un ciel très-pur. Chaque élément simple de la pile renfermait un cylindre de charbon de $0^m,055$ de diamètre, et qui était plongé dans l'acide de $0^m,09$. La lumière produite par du gaz oxygène et hydrogène projeté sur de la chaux, a été trouvée égale seulement à 1/146 de celle du soleil (*Arch. de l'électr.*, t. IV).

M. Bunsen, en se servant d'une de ses piles à 48 éléments, et en

éloignant les pointes de charbon à 7 millimètres, a trouvé que la lumière produite était égale à celle de 572 bougies. La dépense pour entretenir cette lumière pendant une heure était de 0k,300 de zinc, 0k,456 d'acide sulfurique, et de 0k,608 d'acide nitrique d'une densité de 1/306.

1107. MM. Fizeau et Foucault ont encore fait plusieurs observations importantes, que nous croyons devoir rapporter. Une certaine quantité de charbon est transportée au pôle négatif, et ce dernier, de même que l'extrémité de la pointe positive, a changé de nature : de dur et compacte, il est devenu mou, traçant, et semblable à la plombagine. Lorsque le pôle négatif est terminé par du charbon et l'autre par de l'argent, l'arc lumineux se forme facilement : bientôt l'argent fond et distille abondamment; dès lors, on peut éloigner davantage le charbon négatif sans rompre l'arc lumineux, qui est d'une fixité et d'une beauté remarquables. Si on intervertit les pôles, le phénomène n'est plus le même; quand l'argent est entré en fusion, l'arc se brise. Le platine et le charbon produisent le même effet. Quand on décompose l'eau avec des fils assez fins et une pile de 80 couples : les fils s'échauffent sans rougir; mais les gaz qui les enveloppent sont lumineux, et leur dégagement est accompagné d'un bruit particulier. Le phénomène est plus marqué au pôle négatif : on remarque que tant que les gaz sont lumineux, l'intensité du courant est beaucoup affaibli.

Quand on met les extrémités d'une pile en contact avec des fils métalliques de différentes natures, et qu'on approche les extrémités libres à une très-petite distance, il s'établit un courant continu d'étincelles, et il se présente des phénomènes remarquables, qui varient avec la nature des métaux. Lorsqu'un des fils est en or, l'autre en platine, le platine devient rouge blanc, et l'or ne change pas; un des fils étant en or et l'autre en argent, l'or seul entre en ignition. Lorsque les fils sont en or et en cuivre, tous deux rougissent; quand ils sont en fer et en platine, le platine devient rouge blanc et le fer coule. Les fils étant en platine et en zinc, le platine devient rouge blanc et le zinc ne change pas; les fils étant en fer et en zinc, le fer coule et le zinc ne fond pas; enfin, quand les fils sont en zinc et en argent, le zinc entre en ignition et coule, et l'argent ne change pas. Ces phénomènes ont été observés par M. Children : il employait une pile de Wollaston de 21 couples, dans lesquels le zinc avait une surface de 32 pieds; les fils avaient 8 pouces de long et 1/3 de ligne d'épaisseur.

Le fil qui réunit les deux pôles s'échauffe d'autant plus qu'il est d'un plus petit diamètre; quand on réunit les deux pôles d'une pile par une chaîne composée de plusieurs fils métalliques de même nature et de même diamètre, attachés les uns à la suite des autres, c'est toujours aux points d'attache que se manifeste l'incandescence; quand les fils sont de nature différente, ce sont toujours les fils formés des métaux les moins conducteurs qui s'échauffent davantage; enfin, quand on fait communiquer les deux pôles de la pile par une tige de plante grasse, elle s'échauffe tellement que l'eau qu'elle renferme finit par entrer en ébullition, probablement parce que le liquide qu'elle contient est séparé par de nombreuses cloisons végétales.

L'interposition des diaphragmes métalliques dans le circuit, qui diminue peu l'action du courant sur l'aiguille aimantée, a une très-grande influence sur le développement de la chaleur. M. de la Rive, en faisant passer le courant à travers l'hélice d'un thermomètre de Breguet, et intercalant dans une partie du circuit formée d'un vase allongé rempli d'eau salée, successivement 1, 2 et 3 diaphragmes métalliques, obtint, pour la déviation de l'aiguille aimantée, 85°, 84°, 83°, et pour la déviation de l'aiguille du thermomètre, 312°, 170°, 75°.

1108. *Lois relatives à la chaleur produite dans un circuit par un courant à haute tension et de courte durée.* M. Reiss a fait de nombreuses expériences pour déterminer la chaleur produite dans un fil qui établissait la communication entre les deux armatures d'une batterie électrique. La température du fil s'observait au moyen d'un fil de platine faisant partie du circuit, et qui traversait le réservoir d'un thermomètre à air. Le résultat de ces expériences peut s'énoncer ainsi : l'élévation de température d'un fil homogène inséré dans le circuit d'une batterie électrique est en raison directe de la quantité d'électricité accumulée dans la batterie, en raison inverse de la durée de la décharge et en raison inverse de la quatrième puissance de son rayon; ou plus simplement : l'échauffement du fil est proportionnel à la quantité d'électricité qui traverse le fil dans un temps donné, à la résistance qu'il oppose et en raison inverse de sa section.

Considérons une batterie ayant une surface s, chargée d'une quantité q d'électricité; établissons la communication entre les deux armatures par un fil homogène d'une longueur l et d'un rayon r; et intercalons dans le circuit un autre fil de longueur l' et de rayon r'. La décharge produira dans le se-

cond fil un accroissement de température T, représenté par la formule suivante.

$$T = \frac{a}{r'^4}\left(\frac{1}{1+\frac{bl}{r^2}}\right)\frac{q^2}{s}\ldots\ (1),$$

a et b étant deux constantes, qui devront être déterminées par l'expérience. Quand le premier fil ne changera pas, la formule se réduira à

$$T = \frac{K.q^2}{r'^4.s}\ldots\ (2).$$

Si le circuit est formé d'un seul fil, $r = r'$, et il vient

$$T = \frac{a}{r^2}.\frac{1}{r^2+bl}.\frac{q^2}{s}\ldots\ (3).$$

M. Reiss ayant trouvé pour la durée z de la décharge

$$z = \left(1+\frac{bl}{r^2}\right).\frac{s}{q}\ldots\ (4),$$

la formule (1) devient

$$T = \frac{a}{r^4}.\frac{q}{z}\ldots\ (5).$$

Remarquons maintenant que l'expression $q : z$ représente la quantité d'électricité qui s'écoule dans le fil pendant l'unité de temps, que $1 : r^2$ est proportionnelle à la résistance du fil, et que l'échauffement qu'il éprouve varie aussi dans le même rapport; alors la formule (5) conduit au dernier énoncé de la loi de M. Reiss.

Ces formules ne conviennent qu'à des fils de même nature; pour les rendre générales, il suffirait de diviser la valeur de T par le produit cd, de la capacité calorifique du fil et de sa densité (*A. C. et P.*, t. LXIX).

Si on ne fait varier que q et s, la formule (1) devient $T = Kq^2 : s$ (6). M. Harris et ensuite M. Masson ont trouvé qu'en appelant d la distance d'explosion, et k une constante qui change avec le condensateur, on avait $d = kq : s$. Si on substitue la valeur de q, tirée de cette dernière équation dans l'équation (6), il vient

$$T = K'd^2s.$$

Or, cette expression de la température du fil est exactement celle que M. Masson a trouvée pour l'intensité de la lumière qui se produit par la décharge à une distance d. M. Masson déduit de là ce fait remarquable : Si des courants produits par la décharge d'une batterie donnent naissance à de la lumière dans un point d'interruption du circuit, et à de la chaleur dans un fil faisant partie du même circuit, les quantités de la chaleur sont proportionnelles aux quantités de lumière.

1109. ***Lois relatives à la chaleur produite par un courant continu qui parcourt un circuit homogène.*** M. Joule a reconnu que l'élévation de température d'un fil métallique interposé dans un circuit

est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance du fil (*Arch. de l'électr.*, n° 4). M. E. Becquerel, par des expériences plus exactes, est arrivé aux mêmes résultats (*A. C. et P.*, t. IX). Plus récemment, M. Botto de Turin a confirmé ces résultats, et les a considérés sous un point de vue particulier d'un grand intérêt, mais que les bornes de ce traité ne nous permettent pas d'exposer (*Arch. de l'électr.*, n° 19). Nous nous contenterons d'indiquer les moyens d'observation employés par M. E. Becquerel. L'intensité du courant était mesurée, comme dans les expériences de M. Joule, par un voltamètre; la chaleur du fil était estimée au moyen d'un appareil analogue à celui dont Delaroche et Bérard se sont servis pour déterminer les chaleurs latentes des gaz; il consistait en un petit vase decuivre plein d'eau, renfermant une hélice en verre autour de laquelle était enroulé un fil de platine faisant partie du circuit. L'électricité était produite par une pile à effet constant. It résulte des nombreuses expériences de M. E. Becquerel, que la quantité de chaleur qui traverse un fil métallique dans un temps donné est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance du fil; et que l'élévation de température du fil, qui varie en outre en raison renversée de sa section, est proportionnelle au carré de l'intensité du courant, et en raison inverse de la quatrième puissance du rayon. La dernière loi est la même que celle trouvée par M. Reiss pour les décharges provenant des batteries [1108]; il n'en est pas ainsi de la première. Mais les circonstances ne sont pas les mêmes : pour les batteries, le courant se produit brusquement et varie d'intensité pendant sa durée, tandis que les courants voltaïques sont établis et constants quand on mesure leurs effets thermométriques.

Quand le courant traverse un liquide, les phénomènes sont beaucoup plus compliqués, parce que les liquides ne sont conducteurs qu'autant qu'ils produisent des actions chimiques; et, par conséquent, la chaleur produite par le courant se trouve modifiée par celle qui est émise ou absorbée par les effets chimiques. L'intensité du courant était toujours mesurée par le volume de gaz résultant de la décomposition de l'eau; le liquide était renfermé dans un creuset de platine, isolé, fermé, communiquant avec un des pôles de la pile, et dans lequel se trouvaient deux plaques métalliques communiquant avec l'autre pôle; il contenait en outre le réservoir d'un thermomètre très-sensible. Voici les résultats auxquels M. E. Becquerel est arrivé.

Si le liquide est une dissolution métallique, que les plaques métalliques qui établissent sa communication avec la pile soient de même nature que la base du sel, et qu'il ne se développe point de gaz, le courant produit un dépôt métallique au pôle négatif, et une dissolution de la même quantité de métal au pôle positif; alors la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance qu'il éprouve, comme pour les corps solides. C'est ce qui arrive, par exemple, quand le liquide est une dissolution de sulfate de cuivre, et que les plaques sont en cuivre. Si l'action chimique se réduit à la décomposition de l'eau, les mêmes lois se vérifient encore, en ajoutant à la chaleur produite celle qui a été absorbée par la décomposition de l'eau. Lorsque les actions chimiques sont plus compliquées, les lois se vérifieraient encore en ayant égard aux quantités de chaleur qu'elles absorbent ou produisent.

1110. On doit à Peltier des expériences extrêmement curieuses sur la production de la chaleur dans un circuit formé de deux métaux. Lorsque deux fils de métaux ductiles sont soudés bout à bout, un même courant, en traversant ces fils, produit des effets de chaleur qui varient avec le sens du courant; la plus grande chaleur a lieu à la soudure, quand le courant passe du meilleur conducteur au plus mauvais : ainsi, quand l'un des fils est en cuivre, l'autre étant en fer, en plomb ou en étain, la plus grande chaleur a lieu quand le courant passe du fil de cuivre dans l'autre fil. Quand un des métaux est du bismuth, de l'antimoine ou du fer à gros grains, et que le courant ne dépasse pas une certaine limite d'intensité, le courant dans certaines directions produit du froid à la soudure : par exemple, un cylindre de bismuth étant soudé par ses deux extrémités à un fil de cuivre communiquant avec les extrémités d'une pile à un seul élément, à la soudure où le courant passe du cuivre au bismuth, il y a élévation de température; à l'autre, où le courant passe du bismuth au cuivre, il y a abaissement de température : en remplaçant le bismuth par l'antimoine, c'est le contraire qui a lieu. En soudant bout à bout deux cylindres, l'un d'antimoine, l'autre de bismuth, quand le courant passe de l'antimoine au bismuth, il y a élévation de température, et abaissement quand le courant marche en sens contraire. Ces variations de température ont été observées au moyen d'une pile thermo-électrique, comme nous l'expliquerons plus loin. Mais le refroidissement dans le cas du passage du courant du bismuth à l'antimoine a été constaté directement en plaçant la soudure dans une boule métal-

lique, terminée par un tube de verre capillaire plongé par la partie inférieure dans un liquide coloré (fig. 702) : le liquide s'élève dans le tube quand le courant passe du bismuth à l'antimoine, et marche en sens contraire quand le courant passe de l'antimoine au bismuth. Quand le courant augmente d'intensité, il y a élévation de température dans la soudure; mais elle varie avec le sens du courant.

§ 6. *Effets chimiques produits par les courants.*

1111. *Décomposition de l'eau.* Le premier effet chimique obtenu par les courants électriques continus a été la décomposition de l'eau; cette importante découverte a été faite par MM. Carlisle et Nickolson. On peut la vérifier en plongeant deux fils de platine communiquant avec les pôles d'une pile dans un vase plein d'eau, tenant en dissolution un sel ou un acide : le gaz oxygène se dégage autour du fil immergé qui communique avec le pôle positif et l'hydrogène sur le fil communiquant avec le pôle négatif. Si on employait de l'eau pure, sa faculté conductrice étant très-faible, l'eau ne serait décomposée qu'autant que la pile serait très-forte. Si on se servait de deux fils d'un métal facilement combustible, l'oxygène se combinerait avec le métal, et l'on obtiendrait seulement un dégagement d'hydrogène. On peut monter l'appareil de manière à recueillir les gaz : il faut pour cela mettre l'eau acidulée ou chargée de sels dans un entonnoir (fig. 703), dont le fond large est fermé par un bouchon mastiqué, à travers lequel passent deux fils de platine qui s'élèvent de quelques centimètres, et dont les prolongements inférieurs communiquent avec les pôles d'une pile; en recouvrant les fils avec deux petites cloches pleines de liquide, les gaz dégagés se réunissent dans les cloches, et on peut facilement en déterminer la nature et le volume : on obtient, ainsi que l'indique la composition de l'eau, un volume d'oxygène et deux volumes d'hydrogène. Le dégagement des gaz est d'autant plus abondant que l'eau renferme plus de sel ou d'acide.

Si les deux fils étaient placés dans la même cloche, les gaz seraient mêlés; l'appareil ainsi disposé, porte le nom de *voltamètre :* il est employé pour mesurer l'action chimique d'un courant : car le poids de l'eau décomposée est proportionnel au volume de gaz dégagé. La cloche est divisée en parties qui représentent des volumes égaux.

L'eau distillée pure, placée dans les mêmes circonstances, donne

souvent sur les fils de platine un acide et une substance alcaline; ce résultat singulier provient de ce que l'eau qui a été distillée vivement renferme encore souvent des matières salines, et que les vases de verre sont eux-mêmes attaqués par le courant voltaïque; mais de l'eau distillée lentement dans des vases d'argent, et placée dans des vases d'or pur, ne donne naissance à aucune substance acide ou alcaline (Davy).

1112. Si l'on plonge dans de l'eau légèrement acidulée par de l'acide sulfurique un fil de zinc, purifié par distillation, et un fil d'argent, tant que les deux fils sont séparés, il ne se dégage point de gaz; mais si on les met en contact extérieurement, il se dégage de l'hydrogène sur le fil d'argent et l'oxygène se combine avec le zinc. Si le zinc est impur, et tous ceux qui n'ont pas été distillés sont dans ce cas, il se dégage de l'hydrogène sur le zinc, avant et après le contact des fils. On explique cette action directe de l'eau acidulée sur le zinc impur, en admettant que les parcelles des métaux étrangers qui sont à la surface du fil forment avec celles de zinc de petits éléments voltaïques, dont les effets s'ajoutent à celui qui résulte du contact extérieur des fils. Les fils de zinc ordinaire amalgamés se comportent comme les fils de zinc pur.

1113. *Décomposition des autres corps.* Cruikshank, en répétant l'expérience de la décomposition de l'eau avec une dissolution d'acétate de plomb, reconnut que le plomb à l'état métallique se déposait au pôle négatif; les dissolutions de cuivre et d'argent lui donnèrent des résultats analogues. Davy démontra ensuite que tous les sels solubles et en dissolution étaient décomposés par la pile; que l'acide se portait au pôle positif, et l'oxyde au pôle négatif. On peut facilement constater ce fait en mettant une dissolution saline colorée en bleu par une infusion de chou rouge (substance qui se colore en rouge par les acides et en vert par les alcalis, et qui est d'une sensibilité extrême) dans un tube recourbé (fig. 706), et plongeant dans chaque branche un fil de platine qui communique avec un des pôles de la pile : la liqueur qui environne le fil positif prend une teinte rouge, et celle qui baigne le fil négatif passe au vert. Ces effets sont appréciables avec une très-petite quantité de sels. De l'eau distillée parfaitement pure a même donné des signes d'acidité et d'alcalinité; mais l'alcali provenait du verre, et l'acide, de l'oxygène de l'eau, qui, à l'état de gaz naissant, avait formé de l'acide nitrique avec l'azote de l'air en dissolution dans l'eau.

Quand l'acide et la base d'un sel sont difficilement décomposables, les deux éléments sont seulement séparés : l'acide se rend au pôle positif, et la base au pôle négatif. Si l'acide est facilement décomposable, le sel et l'acide sont décomposés : l'oxygène se rend au pôle positif, et les bases du sel et de l'acide au pôle négatif. Quand l'oxyde peut être décomposé, il est réduit : son oxygène et l'acide se réunissent au pôle positif, et le métal de l'oxyde se rend au pôle négatif. Enfin, quand l'acide et l'oxyde sont tous deux facilement réductibles, tous deux sont décomposés : les radicaux de l'acide et de l'oxyde se rendent au pôle négatif, et l'oxygène de l'acide et de l'oxyde se réunisent au pôle positif.

Pour que ces phénomènes se produisent, il faut que le sel soit humide ou en dissolution dans l'eau ou en fusion ignée; dans les deux premiers cas, il y a en même temps beaucoup d'eau décomposée. Lorsqu'on soumet à l'action d'une pile un sel dont les éléments sont facilement décomposables, on peut à volonté obtenir la séparation de l'acide et de l'oxyde, ou la réduction de l'un et de l'autre, en faisant varier la force de la pile, ou seulement, en augmentant ou en diminuant la distance des fils qui communiquent avec les pôles et qui plongent dans le liquide, parce que l'intensité du courant varie avec l'espace qu'il est obligé de parcourir dans le liquide.

Il y a cependant des corps qui ne sont point décomposés par la pile : tel est l'acide sulfurique très-concentré; il est probable que cela tient au défaut de conductibilité de ces corps ; pour d'autres la décomposition ne peut être constatée dans les circonstances ordinaires, parce que s'ils étaient décomposés, ils se reformeraient : tels sont les oxydes des métaux qui décomposent l'eau. Lorsque plusieurs éléments simples ou composés se réunissent simultanément aux pôles, il en résulte des produits secondaires et des phénomènes souvent compliqués. Nous nous bornerons à donner quelques détails sur la réduction de la potasse et de la soude.

1114. Comme les bases des alcalis sont des métaux oxydables à l'air, et qui décomposent l'eau à la température ordinaire, on ne pouvait employer que la potasse sèche, et on n'obtenait que des atomes de métal, qui se détruisaient presque aussitôt. Mais le docteur Seebeck découvrit un moyen très-simple de soustraire le métal à l'action de l'air. Ce procédé consiste à creuser dans un morceau d'hydrate alcalin solide une cavité que l'on remplit de mercure; on le place sur une plaque métallique que l'on fait communiquer avec le pôle positif, et l'on plonge le fil négatif dans le mercure :

le métal alcalin réduit se combine avec le mercure, tandis que l'oxygène de l'alcali et de l'eau se rend au pôle positif. Pour que cette décomposition ait lieu, il faut employer une pile assez énergique, au moins de 50 paires de 6 à 8 centimètres de côté. Lorsqu'on veut seulement reconnaître la présence du métal alcalin dans le mercure, il suffit de le jeter dans l'eau : il se dégage de l'hydrogène, et l'eau devient alcaline. Pour retirer le métal de l'amalgame, on prolonge l'opération, en renouvelant de temps en temps le mercure et jetant l'amalgame dans de l'huile de naphte; lorsqu'on a recueilli une suffisante quantité d'amalgame, on le distille avec l'huile de naphte dans une cornue de verre : l'huile et le mercure se volatilisent, et on trouve le métal alcalin pour résidu. MM. Gay-Lussac et Thénard ont ensuite découvert un procédé purement chimique beaucoup plus simple pour obtenir le potassium et le sodium.

1115. *Lois des décompositions chimiques par les courants.* Nous parlerons d'abord de certaines dénominations nouvelles introduites par M. Faraday, et qui sont maintenant généralement adoptées. Quand deux corps conducteurs, en communication avec les pôles d'une pile, plongent dans un vase qui renferme un liquide, ces deux corps sont désignés sous le nom d'*électrodes :* l'électrode positif est celui qui communique avec le pôle positif de la pile et où se montrent l'oxygène, les acides; l'électrode négatif est celui qui communique avec le pôle négatif de la pile et où se réunissent l'hydrogène, les corps combustibles, les métaux. M. Faraday appelle *électrolytes* les corps placés entre les électrodes et qui sont décomposés; et le mot *électrolyser* est synonyme de décomposer. Le même physicien avait proposé d'autres noms pour remplacer ceux de positifs et de négatifs; mais ils ne sont pas généralement admis : c'est pourquoi nous les passons sous silence.

M. Faraday a découvert cette loi remarquable : Si un même courant traverse successivement une série de dissolutions décomposables par le courant, les poids des éléments déposés sur les électrodes positifs ou négatifs sont dans les rapports de leurs équivalents chimiques. Ainsi, par exemple, si les matières dissoutes sont des nitrates de cuivre, d'argent, de plomb, de mercure, ces sels sont décomposés, et les poids des métaux réduits sont entre eux dans les rapports des poids qui se combinent avec une même quantité d'oxygène. Il suit de là, que dans tous les éléments de la pile il y a la même quantité d'eau décomposée, et la même quantité de zinc dissous, quelles que soient leurs formes et leurs grandeurs, pourvu

toutefois que les plaques de zinc soient amalgamées, afin qu'il n'y ait d'action chimique que celle qui provient du courant. Il résulte aussi de la loi de M. Faraday, que si on intercale dans le circuit un nombre quelconque de voltamètres, tous produiront dans le même temps la même quantité de gaz, quelles que soient leurs formes et leurs dispositions; mais pour la même pile, la quantité de gaz produite dans chacun d'eux sera d'autant plus grande que leur nombre sera plus petit, parce que chacun augmente la résistance et diminue l'intensité du courant. Si un ou plusieurs renfermaient des dissolutions salines dont les oxydes fussent réductibles par l'hydrogène, les électrodes étant toujours en platine, il ne se dégagerait que de l'oxygène, et le métal réduit se déposerait sur les électrodes négatifs.

La loi établie par M. Faraday a été vérifiée par M. Matteucci, par M. Daniell et récemment par M. E. Becquerel sur plusieurs composés binaires et tertiaires (*A. C. et P*, t. XI). Ainsi il n'est pas douteux que cette loi ne soit aussi générale que l'habile physicien anglais l'avait supposé.

1116. *Transport des éléments séparés.* Toutes les décompositions chimiques présentent un phénomène très-remarquable : les éléments du corps décomposé ne se dégagent ou ne se précipitent que sur les fils communiquant avec les pôles de la pile. Ce transport des éléments séparés paraît encore bien plus extraordinaire dans plusieurs expériences de MM. Berzélius et Hysinger. Si l'on met du sulfate de soude dans deux coupes séparées et communiquant par un fil d'amiante, en plongeant le fil positif dans l'une et le fil négatif dans l'autre, le sel est décomposé, et au bout de quelques heures tout l'acide se trouve dans une des coupes, et tout l'oxyde dans l'autre. Si l'on met dans les deux coupes des sels différents, les deux acides passent dans une coupe et les deux oxydes dans l'autre. Si on place entre deux coupes chargées, l'une de sel, et l'autre d'eau pure, une troisième coupe communiquant avec les deux autres par des fils d'amiante et renfermant une matière colorante facilement altérable par les acides et les alcalis, telle qu'une infusion de chou rouge, le sel renfermé dans la première coupe est décomposé, son acide ou sa base se transporte dans la coupe où plonge l'autre fil, et le liquide intermédiaire à travers lequel passe un acide ou un alcali, suivant que l'on aura plongé dans la dissolution saline le fil négatif ou le fil positif, n'éprouve aucune altération. En général, les éléments séparés par des cou-

rants électriques peuvent traverser des dissolutions de corps ayant pour eux une grande affinité, sans que la combinaison ait lieu; il n'y a qu'une seule exception, c'est quand le liquide renferme une substance qui, en se combinant avec l'élément entraîné, peut former un corps insoluble : alors la combinaison s'effectue, à moins que le courant ne soit très-énergique.

1117. On a fait plusieurs hypothèses pour expliquer le dégagement aux pôles des éléments séparés par le courant électrique. Une seule rend compte d'une manière satisfaisante de l'ensemble des phénomènes, c'est celle de Grothus. Ce physicien admet une décomposition à chaque pôle de la pile par les électricités contraires des éléments du corps, et, en outre, que toutes les molécules comprises entre les deux pôles éprouvent une décomposition et une recomposition successives; de sorte qu'il n'y a que les éléments opposés des molécules extrêmes qui, ne se recomposant pas, se dégagent ou se précipitent aux pôles. Par exemple, dans la décomposition de l'eau, la molécule qui est immédiatement en contact avec le pôle positif est décomposée, l'atome d'oxygène se dégage, et l'atome d'hydrogène s'empare de l'atome d'oxygène de la molécule suivante; l'hydrogène mis en liberté agit de la même manière sur la molécule d'eau suivante, et ainsi de suite jusqu'au pôle négatif, où l'atome d'hydrogène se dégage.

1118. *Influence des diaphragmes métalliques interposés dans la partie liquide du circuit.* Lorsqu'on interpose des diaphragmes métalliques dans une dissolution saline traversée par un courant électrique, de manière que le courant soit obligé de les traverser, il se forme des précipités contre chaque face de ces lames, et la force du courant diminue à mesure que le nombre des plaques augmente. M. de la Rive, à la suite d'un grand nombre d'expériences, a obtenu les résultats suivants : 1° si l'on divise un vase allongé renfermant une dissolution saline en plusieurs compartiments, par des lames métalliques, les éléments de l'eau se dégagent sur chacune d'elles, l'oxygène d'un côté et l'hydrogène de l'autre; la diminution d'intensité que le courant éprouve en traversant ces lames est d'autant plus petite que le courant est plus énergique, et que, pour chaque intensité, il provient d'une pile renfermant un plus grand nombre de couples; 2° de deux courants ayant la même intensité, l'un à la sortie de la pile, le second après avoir traversé plusieurs lames métalliques séparées par un liquide conducteur, le premier diminue beaucoup plus par l'interposition

d'une lame métallique que le second; 3° les métaux interposés diminuent d'autant moins l'énergie du courant, que le métal est plus oxydable : ainsi, des lames de zinc non amalgamé ne produisent aucun effet, quel qu'en soit le nombre; 4° l'étendue des surfaces des plaques et la longueur du trajet dans les liquides ne paraissent pas avoir d'influence; 5° les courants éprouvent, en passant à travers des conducteurs liquides imparfaits, tels que l'eau pure, la même modification qu'en passant à travers des plaques métalliques : ils traversent des plaques métalliques et de nouveaux conducteurs imparfaits avec d'autant plus de facilité qu'ils en ont déjà traversé davantage.

1119. *Effets chimiques produits par des piles à faible tension.* Jusqu'ici nous n'avons considéré que les effets résultant de courants énergiques : M. Becquerel est parvenu, à l'aide de courants d'une faible intensité, à produire des réductions et des combinaisons qui sont d'un grand intérêt, et parce que plusieurs d'entre elles sont difficiles à produire par d'autres moyens, et parce qu'on obtient les corps en cristaux réguliers. On prend un tube recourbé en U, de 2 à 3 millimètres de diamètre, au fond duquel on place un tampon d'amiante. On verse dans l'une des branches une dissolution de sulfate de cuivre mélangée avec une certaine quantité de deutoxyde du même métal qui va au fond, et dans l'autre une dissolution d'un hydrochlorate avec du même sel non dissous. Prenons d'abord du sel marin, et établissons la communication par une lame de cuivre; bientôt le bout, qui est plongé dans la dissolution du sulfate, se recouvre de cuivre à l'état métallique; l'acide sulfurique mis à nu, qui ne va pas à l'autre pôle, se porte sur l'oxyde qui est au fond du tube, en dissout une partie, d'où résulte une nouvelle décomposition par l'action permanente de la petite pile; de sorte qu'il s'opère de ce côté une suite non interrompue de décompositions et de recompositions. Dans l'autre branche du tube, une partie de l'hydrochlorate de soude est décomposée; l'acide hydrochlorique se porte sur le cuivre, qui s'est oxydé, comme étant à l'état positif, et donne naissance probablement à un oxychlorure qui se combine avec le chlorure de sodium : il se forme peu à peu sur la lame de cuivre des cristaux octaèdriques.

Si l'on prend un tube fermé à une de ses extrémités, de 2 à 3 millimètres de diamètre, renfermant du peroxyde de plomb, une dissolution d'hydrochlorate d'ammoniaque et une lame de plomb qui touche l'oxyde et la dissolution, il se forme en peu de jours sur la

lame de plomb un grand nombre de cristaux de chlorure de plomb et d'ammoniaque.

Par des méthodes analogues, M. Becquerel est parvenu à former un grand nombre de sels doubles et des cristaux de sels insolubles, par exemple des sulfates de chaux et de baryte ayant la forme de ceux qu'on rencontre dans la nature : ces résultats, qui en promettent de plus importants encore, conduiront probablement à des notions précises sur la formation des cristaux naturels, qui jusqu'ici n'avaient pu être imités dans nos laboratoires. (*Traités de l'électricité, de physique et d'électrochimie* de M. Becquerel.)

1120. *Polarités acquises par les lames métalliques qui ont servi aux décompositions chimiques.* Les corps solides qui ont servi de conducteur à l'électricité, lorsqu'une partie du circuit était formée par un corps liquide, acquièrent la propriété de donner lieu à un courant lorsqu'ils font partie d'un circuit renfermant un liquide : ainsi, lorsqu'on termine les deux pôles d'une pile par deux fils de platine, qui plongent dans une solution d'hydrochlorate d'ammoniaque ou dans tout autre corps liquide qu'ils décomposent, si après quelques instants on les met en communication avec les extrémités d'un multiplicateur, et qu'on interpose entre eux un liquide conducteur, l'aiguille du multiplicateur indique l'existence d'un courant, et ce courant est en sens contraire de celui qui existait quand les deux fils étaient en contact avec les deux pôles de la pile ; un seul fil suffit pour l'établir. Le temps pendant lequel les fils sont restés dans le courant de la pile a une grande influence sur la faculté électro-motrice qu'ils acquièrent, sur l'intensité et la durée du courant qu'ils produisent. Un fil conducteur laissé vingt ou trente minutes dans le courant, lavé et essuyé, possède encore après plusieurs jours la faculté d'établir un courant (M. de la Rive). Le phénomène dont il est question peut être vérifié d'une manière très-simple : on prend deux vases de verre A et B (fig. 706 A), remplis d'eau acidulée, qui communiquent entre eux et avec les extrémités d'une pile par des fils de platine *a, b, c;* après que le circuit est resté fermé un certain temps, on supprime les fils *a* et *c,* on ferme le circuit par une mèche de coton humide, et les gaz continuent à se dégager aux extrémités du fil *b;* mais la nature du gaz qui se dégage à une même extrémité est changée.

Ce phénomène provient uniquement des acides et des alcalis qui se déposent sur les plaques ou les fils, et qui résistent aux lavages : car, si on plonge des fils de platine, l'un dans de l'eau contenant

un millième d'acide nitrique, et l'autre dans de l'eau contenant un millième de son poids de potasse caustique, ces fils, lavés et essuyés, se comportent comme s'ils avaient servi à des décompositions chimiques. On voit aussi pourquoi le courant marche en sens contraire : car, quand un alcali est en contact avec un acide, le courant va de l'acide à l'alcali. Ces dernières observations, dues à M. Becquerel, expliquent parfaitement tous les effets des piles de Ritter [1041].

Lorsque des lames de platine ont été employées pour décomposer l'eau, et qu'elles restent en partie plongées dans le mélange des deux gaz, après qu'on a interrompu le circuit, le volume des gaz diminue rapidement par la recomposition de l'eau. M. Faraday a reconnu que cette propriété n'appartient qu'à la plaque qui a servi de pôle positif; que cette propriété diminue graduellement; qu'elle se conserve plus longtemps quand les plaques sont renfermées dans des vases clos, ou quand elles sont plongées dans des dissolutions acides ou alcalines, que quand elles sont exposées à l'air libre; et qu'enfin, l'action de la chaleur, des acides et des alcalis, développe cette propriété dans les plaques qui n'ont point servi à des décompositions.

1121. *Propriété singulière du fer.* Ordinairement le fer est très-vivement attaqué par l'acide nitrique, et quand il forme l'électrode négatif d'une dissolution dont la base est réductible par l'hydrogène, le métal réduit se dépose sur le fer. Mais dans certaines circonstances il perd complétement ces propriétés et peut rester pendant un grand nombre de jours dans l'acide nitrique en conservant son brillant métallique. Ces phénomènes ont été étudiés par un grand nombre de physiciens et récemment par MM. Faraday et Schœnbein. Le fer peut être rendu inactif en le chauffant au rouge et le laissant refroidir; en le plongeant dans l'acide nitrique concentré; en le touchant, quand il est plongé dans l'acide nitrique ordinaire, avec un fil de platine, du charbon, de la plombagine, ou du fer déjà rendu inactif; en le faisant servir d'électrode positif. Le fer inactif conserve sa propriété quand on l'expose à l'air ou qu'on le plonge dans l'eau ou dans l'ammoniaque; il devient actif si on frotte sa surface (M. Becquerel, *Traité de l'électr.*, t. v). On trouve dans le n° 5 des *Archives de l'électricité* un mémoire de M. Schœnbein qui renferme quelques faits fort remarquables. Les deux pôles d'une forte pile communiquent avec deux godets pleins de mercure; un vase renfermant de l'acide sulfurique très-

étendu communique par une lame de platine avec le pôle négatif, et avec le pôle positif par un fil de fer; il ne se dégage point d'hydrogène sur la lame de platine, et le fer n'est point attaqué. Cet état passif disparaît : 1° en mettant pour un moment en contact, avec l'électrode positif de fer, l'électrode négatif de platine, dans le liquide même de décomposition; quand le contact cesse, il se fait un vif dégagement d'hydrogène sur la lame de platine, mais qui cesse au bout de quelques secondes; 2° en ouvrant le circuit pendant quelques instants, et le refermant, l'action chimique est vive, mais de peu de durée; 3° en mettant en contact dans le liquide le fer avec du zinc, de l'étain, du cuivre ou de l'argent, l'effet est également d'une courte durée; 4° en faisant communiquer les deux godets pleins de mercure par un fil de cuivre de 8 centimètres de longueur et de 1 millimètre d'épaisseur, en l'éloignant, il se fait un vif dégagement de gaz, mais qui ne dure que quelques secondes; 5° en agitant fortement la partie du fil de fer qui plonge dans le liquide, mais sans rompre le circuit. Ces faits et beaucoup d'autres consignés dans le mémoire sont encore sans explication bien satisfaisante. M. de la Rive pense que la passivité du fer provient d'une légère couche d'oxyde très-adhérente, peu soluble dans les acides, dont le métal se recouvre dans les circonstances où il prend l'état dont il est question. M. Schœnbein a annoncé (*Arch. de l'électr.*, année 1842) qu'il avait construit une pile avec du fer actif et du fer passif, aussi puissante que celles qui sont connues.

1122. *Anneaux colorés produits par l'action des courants électriques.* Léopold Nobili est parvenu, au moyen d'un courant voltaïque, à produire sur des plaques de différents métaux des dessins réguliers colorés des teintes les plus vives. Le procédé employé par ce physicien consiste à faire, avec une matière quelconque, un rebord à la plaque, de manière à former un vase, que l'on remplit d'une dissolution saline ou d'un mélange de différentes dissolutions, la plaque communique directement à un des pôles de la pile, et on place dans le liquide un conducteur terminé par une pointe très-aiguë, mais environnée d'un corps isolant jusqu'à son extrémité, qui est placée à 1 millimètre de la plaque; quand le circuit est fermé, il se forme sur la plaque, en regard de la pointe, des cercles concentriques plus ou moins nombreux et diversement colorés; une pile de douze éléments de 27 millimètres carrés suffit. Les teintes sont plus vives quand la plaque est positive que quand elle est négative, et quand on opère avec des dissolutions organiques. Nobili a décrit

les effets qu'on obtient avec un grand nombre de dissolutions minérales, végétales et animales, sur différents métaux, et suivant la nature du pôle de la pile en contact avec la plaque. Nous rapporterons seulement une de ces expériences. Lorsqu'on met une dissolution d'acétate de cuivre et de nitrate de potasse sur une plaque d'argent en contact avec le pôle négatif de la pile, le centre de la plaque, c'est-à-dire le point qui correspond à l'extrémité de la tige qui communique avec l'autre pôle, conserve le brillant métallique; on voit ensuite une série de cercles concentriques dans l'ordre suivant : deux petits cercles d'un vert peu chargé, un blanc, un rouge, un verdâtre, et une zone de cuivre d'un beau rouge de feu; cette zone est environnée d'un cercle azuré marqué de lignes rayonnantes, comme le serait un cercle gradué. Ensuite vient une seconde zone cuivrée, plus large que la première, mais également brillante, entourée d'un cercle d'un beau vert, qui termine la figure. Ces couleurs sont dues à des dépôts d'oxydes ou de métaux en lames minces quand la plaque est négative, et probablement à une altération du métal par les acides quand elle est positive; si le liquide renferme des matières organiques, les anneaux résultent probablement du dépôt des corps séparés par le courant. Lorsqu'on produit simultanément les deux systèmes d'anneaux en plongeant dans le liquide deux pointes communiquant avec les extrémités de la pile, les anneaux sont aplatis dans les parties voisines; si le courant arrive à la fois par les deux pointes et que la plaque soit en communication avec l'autre pôle, les anneaux se rapprochent dans les parties voisines : ces déformations n'ont point lieu quand on place une lame de verre sur la plaque, de manière à isoler les deux parties du liquide dans lesquelles plongent les pointes. Ces effets proviennent, sans aucun doute, des actions répulsives et attractives des courants coniques qui partent des pointes et viennent s'étaler sur les plaques. (*A. C. et P.*, t. XXXIV, p. 280, 419). Plus tard, Nobili est parvenu à donner à ces bandes irisées tous les contours possibles, et à former sur les métaux des dessins très-variés et très-jolis; mais il n'a point fait connaître le procédé qu'il employait.

Priestley avait obtenu des anneaux colorés sur des plaques métalliques par des décharges électriques. En plaçant une pointe métallique à 1 millimètre de distance d'une lame, trente à quarante décharges d'une batterie de 1 mètre carré de surface produisent sur la lame des cercles concentriques de 5 à 7 millimètres de diamètre. Ces anneaux ne changent pas d'aspect en intervertissant

le sens du courant, et c'est le contraire dans les anneaux de Nobili. Les anneaux observés par Priestley, bien caractérisés sur le cuivre et l'acier, très-faibles sur les autres métaux, résultent probablement d'une oxydation de la plaque par la chaleur dégagée.

1123. *Coloration des métaux au moyen du peroxyde de plomb, déposé par un courant électrique.* Imaginons que, dans un vase de verre renfermant une dissolution de potasse saturée de peroxyde de plomb, on plonge une lame de platine communiquant avec le pôle négatif d'une pile à courants constants, et une pièce métallique à surface polie et bien nette. Aussitôt que la communication sera établie, la pièce métallique se recouvrira de couches minces de peroxyde de plomb, dont l'épaisseur ira en augmentant en passant successivement par une série de teintes du plus vif éclat; ces couches sont très-adhérentes aux métaux, et peuvent supporter l'action du brunissoir. Pour ralentir l'action et rendre la teinte uniforme, la lame de platine est remplacée par un ou plusieurs fils de platine fixés dans un tube de verre, de manière que leur extrémité seule soit en contact avec le liquide, et on promène ces fils devant la surface de l'objet pour régulariser ou faire varier la teinte. C'est à M. Becquerel qu'est due cette belle découverte, qui a créé un art nouveau. Pour réussir, il y a de nombreuses précautions à prendre dans la composition du bain, la préparation des surfaces, et dans les détails de l'opération; elles sont décrites avec beaucoup de soin dans le mémoire de M. Becquerel (*Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 1844).

1124. *Galvanoplastie.* Nous avons déjà dit, en traitant de l'action chimique de la pile, que le courant voltaïque jouit de la propriété de décomposer les sels métalliques, et que le métal se dépose au pôle négatif. Le métal obtenu par les piles ordinaires est pulvérulent, sans homogénéité, et le plus souvent à l'état d'oxyde. Au moyen des piles à effet constant, d'une intensité convenable, on a obtenu des dépôts homogènes, malléables, tantôt adhérents aux corps qui les reçoivent, tantôt faciles à en séparer. Dans ce dernier cas, le métal a pris l'empreinte fidèle de la surface sur laquelle il s'est déposé. De là la possibilité de reproduire en cuivre, en argent, en or, etc., une médaille dont on possède le moule. Cet art nouveau a pris le nom de galvanoplastie, celui d'électroplastie serait plus convenable.

Volta paraît être le premier physicien qui ait réduit des métaux au moyen de la pile. Brugnatelli obtenait les mêmes résultats en 1803; il dit avoir doré deux grandes médailles d'argent fixées

au pôle négatif d'une pile et plongées dans de l'ammoniure d'or récemment préparé. Mais M. de la Rive est le premier qui se soit occupé avec succès des dépôts métalliques à l'aide de la pile. Pendant qu'il annonçait à Genève la dorure au moyen de l'électricité, M. Jacobi, en Russie, et M. Spencer, en Angleterre, constataient les propriétés plastiques des métaux précipités. Peu de temps après, M. Boquillon reproduisait en France les résultats obtenus par M. Jacobi, sur la simple annonce faite à l'Académie des sciences de cette belle découverte. Nous nous occuperons d'abord des dépôts métalliques non adhérents, de la reproduction des médailles, cachets, planches gravées, etc.

Il faut d'abord que le moule soit conducteur; cette condition sera remplie s'il est en métal. On empêchera l'adhérence du dépôt, soit en recouvrant sa surface d'un léger voile de matière grasse, soit en exposant cette surface pendant quelques instants à l'épaisse fumée qui se dégage des résines en combustion. A ces moyens d'abord conseillés, on préfère l'emploi de la plombagine. On en répand un peu sur la surface, et l'on frotte avec une brosse, un blaireau, selon le cas, jusqu'à ce que cette surface soit brillante. Par ce dernier moyen, l'adhérence n'aura jamais lieu, et la reproduction de l'objet accusera les détails les plus délicats. Si le moule est en plâtre, on commence par le plonger pendant quelque temps dans de la cire en fusion. En le retirant, on souffle vivement sur la surface à reproduire; on évite par là l'accumulation de la cire dans les parties creuses. Il est ensuite recouvert de plombagine, de poussière de cuivre, d'argent, de bronze, etc.

Les médailles reproduites sur des moules en plâtre ont rarement un poli bien satisfaisant; et le succès dépend toujours de la perfection du moule. On obtient de meilleurs résultats au moyen d'un mélange de cire et de plombagine; ce mélange, devenu pâteux par la chaleur, est versé sur la médaille entourée d'une bande de carton; après le refroidissement, on peut détacher le moule; sa surface est parfaitement polie, et, avec quelque soin, le dépôt ne différera pas sensiblement de la médaille reproduite; il ne reste plus qu'à rendre la surface du moule conductrice par la plombagine.

Enfin, les moules peuvent s'obtenir par la pile, en effectuant le dépôt sur l'objet lui-même; on empêchera l'adhérence par les moyens indiqués. Le moule obtenu est de la plus grande perfection, et peut servir à reproduire la médaille autant de fois que l'on voudra; c'est par ce dernier procédé que les planches gravées sont

reproduites au moyen d'un premier dépôt effectué sur la planche elle-même.

L'adhérence n'aura jamais lieu, si le moule a été préalablement doré. Cette opération pouvant s'exécuter avec une très-grande facilité au moyen de la pile, il sera souvent plus avantageux de dorer les moules pour s'opposer à l'adhérence des dépôts, que d'employer les différents procédés indiqués.

Les premiers appareils qu'on a employés étaient semblables à un élément d'une pile de Daniell [1035] : ils consistaient en un vase de verre divisé en deux compartiments par une cloison perméable; d'un côté se trouvait une lame de zinc amalgamée, plongée dans de l'eau acidulée, et de l'autre le moule plongé dans une dissolution de sulfate de cuivre, que des cristaux de cuivre placés à la surface maintenaient saturée; une communication métallique était établie entre le zinc et le moule. Depuis, on a trouvé plus avantageux de séparer l'électro-moteur du vase à décomposition. L'appareil se compose d'un ou de plusieurs éléments à effet constant, dont les pôles communiquent avec un vase formé de matière non conductrice, renfermant le liquide qui doit être décomposé; le moule communique avec le pôle négatif, et l'électrode positif est formé d'une lame du métal en dissolution. Par cette disposition, on est maître de régler convenablement le courant, en soulevant plus ou moins les éléments de la pile, afin que le dépôt se fasse régulièrement; et le bain reste toujours le même, parce qu'il se dissout au pôle positif autant de métal qu'il s'en dépose au pôle négatif. On peut aussi employer plusieurs cuves de décomposition communiquant entre elles; la dépense de zinc est la même que pour une seule, car la quantité de zinc dissoute dans la pile représente l'équivalent en zinc des quantités de cuivre déposées dans chaque auge.

Pour obtenir des résultats satisfaisants, il y a beaucoup de précautions à prendre. Il faut d'abord que l'intensité du courant soit convenable : par un courant trop fort, le dépôt est pulvérulent; par un courant trop faible, il cristallise et ne prend pas l'empreinte du moule.

On aura soin que des bulles d'air ne se logent pas dans les parties creuses de l'objet, au moment de son immersion. Si cela arrivait, il faudrait les enlever, soit avec un pinceau, soit en soufflant vivement sur le moule, après l'avoir fait sortir du bain. Il sera encore bon de ne verser la solution de sulfate qu'après avoir établi toutes les communications; cette solution, surtout si le moule est métal-

lique, devra être complétement neutre; mais, quand le dépôt sera commencé, on pourra la rendre acide sans inconvénient par l'addition d'une certaine quantité d'acide sulfurique. Quand l'appareil fonctionne bien, le dépôt est d'une belle teinte rose, souvent d'un aspect velouté; s'il est rouge et couvert d'aspérités, le cuivre est cassant. Au moyen d'une boussole placée dans le circuit, on pourra savoir si le courant possède et conserve une intensité convenable; mais, avec un peu d'habitude, le dégagement plus ou moins rapide de l'hydrogène indiquera suffisamment si cette condition est remplie.

Le dépôt métallique ne sera d'une épaisseur uniforme qu'autant que tous ses points seront à la même distance, soit du zinc, dans les appareils simples, soit de la lame de cuivre, dans les autres. On en concevra sans peine la raison d'après les lois de la conductibilité. Comme il est impossible de donner à l'électrode positif une surface rigoureusement semblable à celle du moule, la cause de l'inégalité d'épaisseur du dépôt sera atténuée en augmentant la distance des électrodes. Dans le cas où l'on veut recouvrir de cuivre des statuettes, des fruits, des vases, etc., la meilleure disposition est une cuve à décomposition de forme cylindrique, dans laquelle on place un manchon de cuivre de même forme; au centre on suspend l'objet convenablement lesté.

Par ces procédés, on obtient des empreintes de médailles, des statuettes, on reproduit des planches gravées en taille douce avec une admirable exactitude; on recouvre de cuivre des objets très-délicats, tels que des coléoptères, etc. Enfin on doit à M. Fizeau une application très-importante de la galvanoplastie : en dorant des épreuves daguerriennes, le cuivre se dépose sur la surface en conservant l'empreinte des inégalités produites par le mercure; la plaque de cuivre formée se détache facilement de l'épreuve, et présente son image renversé; et, ce qu'il y a de plus remarquable, le moule n'est point altéré et peut produire de nouvelles épreuves.

1125. *Dorure, argenture, platinage, dépôts métalliques quelconques.* D'après ce que nous avons dit sur la précipitation des métaux par un courant, rien ne paraît plus simple à exécuter que les opérations dont il s'agit; mais il n'en est point ainsi, et on ne réussit qu'à l'aide de plusieurs dispositions que nous indiquerons sommairement. Dans la galvanoplastie, on cherche à empêcher l'adhérence du dépôt métallique avec l'objet à recouvrir; ici, au contraire, il faut produire cette adhérence : on y parvient, 1° en ren-

dant bien nettes les surfaces des corps qui doivent être recouverts : si les objets sont en argent, il suffit de les nettoyer avec de la craie, du tripoli, de la ponce, de l'eau de savon; s'ils sont en cuivre ou en laiton, il faut les soumettre aux opérations désignées sous les noms de *décrochage* et de *décapage;* les pièces de fer sont seulement frottées avec de la crème de tartre humide; 2° en employant des dissolutions très-étendues et des piles très-faibles, afin que le dépôt se fasse lentement. Mais ces précautions ne suffisent pas; il faut que le bain ne soit pas acide, et qu'il reste tel pendant l'opération, ou du moins que l'acide dégagé soit absorbé par l'électrode positif, ou que l'acide dégagé soit sans influence sensible sur le métal qui doit recevoir le dépôt. Cette dernière condition est satisfaite quand on se sert de chlorure d'or, en formant l'électrode positif par une lame d'or : le chlore mis en liberté par la précipitation de l'or sur l'électrode négatif attaque la lame d'or, et le bain reste toujours au même point de saturation; mais, comme le chlorure d'or n'est jamais neutre, il est beaucoup plus avantageux d'employer pour le bain du cyanure d'or, attendu que le cyanogène n'attaque point les pièces à dorer (MM. Ruolz et Elkington).

On a proposé un grand nombre de préparations différentes pour les bains d'or; nous n'en rapporterons qu'une seule. Elle se compose de 31g,25 d'oxyde d'or, de 500 grammes de cyanure de potassium et de 4 litres d'eau; on fait bouillir pendant une demi-heure. Ce bain est employé à chaud; c'est à 60° que son action est la plus régulière.

Nous renvoyons aux traités spéciaux pour tous les détails des manipulations. Nous ajouterons seulement que, pour l'argenture ou le platinage, les opérations sont les mêmes; seulement le cyanure d'or est remplacé par le cyanure d'argent ou le chlorure de platine.

C'est à M. de la Rive que sont dus les premiers essais sur la dorure par l'électricité; cet habile physicien employait le chlorure d'or, mais les résultats qu'il obtenait n'étaient pas complétement satisfaisants. C'est seulement depuis que l'élément producteur du courant a été placé hors du bain, de manière à le maîtriser, et que le chlorure a été remplacé par un cyanure, ou qu'une plaque d'or a été employée comme électrode positif, que l'on a obtenu des résultats réguliers; et que cette importante application de la science a passé dans l'industrie.

On emploie aussi pour la dorure un procédé qu'on appelle *dorure au trempé*. Elle est fondée sur ce principe : quand on plonge dans

une dissolution métallique un métal plus oxydable que le métal de la dissolution, l'oxyde dissout est réduit, le métal se dépose sur la plaque, et une partie de celle-ci le remplace; les échanges se font par équivalents. L'ordre des métaux usuels, d'après leur affinité pour l'oxygène, est le suivant. Nous avons ajouté à chaque nom le nombre que représente son équivalent.

Zinc	33	Cuivre	32
Étain	58	Mercure	100
Fer	27	Argent	110
Bismuth	66	Or	200
Plomb	100	Platine	98

C'est en vertu de ce principe qu'une lame de zinc plongée dans une dissolution d'acétate de plomb se couvre de plomb métallique; ce dépôt était désigné autrefois sous le nom d'arbre de saturne. La dorure au trempé s'effectue en préparant les pièces par différentes opérations qui ont pour but de rendre les surfaces nettes, à les plonger pendant un temps suffisant dans un bain de chlorure d'or bouillant, et à leur faire subir ensuite certaines préparations destinées à donner de l'éclat à la dorure.

La dorure au trempé est surtout employée, tant en France qu'en Angleterre, pour les bijoux en cuivre ou en laiton. C'est depuis les recherches de M. Elkington sur ce sujet, que ce mode de dorure a réellement acquis quelque importance. La couche d'or adhérente est toujours d'une faible épaisseur, si la pièce à dorer a été bien décapée. Dans les recherches entreprises par M. Becquerel sur l'influence du décapage, ce savant a reconnu que les lames décapées avec le plus de soin sont précisément celles qui prennent le moins d'or (*Électro-chimie*, p. 329). On en concevra facilement la raison, si l'on observe que sur une pièce parfaitement décapée la couche d'or doit être continue; dès lors l'action chimique cesse dès que la surface est recouverte. Mais sur un objet mal décapé, on dépose par immersion une couche d'or dont l'épaisseur n'a, pour ainsi dire, pas de limite, parce que l'or déposé se trouve en couche discontinue, et que, le cuivre non recouvert pouvant se dissoudre, la précipitation de l'or ne doit point s'arrêter. Dans ces derniers temps, M. Barral, en partant de ce fait, est parvenu à dorer à toute épaisseur des pièces bien décapées. « Il suffit de plonger en même temps du cuivre bien décapé et du cuivre mal décapé dans le bain Elkington. Le second cuivre donne lieu à une action chimique, à un dépôt pulvérulent d'or, à une dissolution permanente de cuivre et à un

courant galvanique. Sur le premier cuivre il y a d'abord dépôt d'or, par la loi ordinaire des précipitations métalliques, et ensuite dépôt d'or par voie électro-chimique. » (*Ann.*, t. XVIII, p. 25.) Par ce même procédé de dorure, l'argent ne se recouvre d'or qu'à la condition de communiquer avec un fil de fer. C'est encore faire au sein du liquide un élément de pile.

Avant la découverte de la dorure au trempé et par un courant électrique, on dorait les métaux en les recouvrant d'un amalgame d'or et de mercure, et en faisant évaporer le mercure par l'action de la chaleur; les ouvriers qui étaient chargés de ces opérations ne résistaient que pendant un temps bien court à l'influence funeste des vapeurs mercurielles. La découverte des nouveaux moyens de dorure est alors non-seulement une acquisition importante pour la science et pour l'industrie, mais encore un grand service rendu à l'humanité.

1126. Le magnétisme exerce sur les actions chimiques une influence remarquable, que nous ne devons pas passer sous silence. Si, après avoir recourbé un tube de verre en forme de V, on le remplit d'une teinture de chou rouge, et qu'on plonge dans chaque branche une tige de fer, dont l'une communique avec le pôle austral et l'autre avec le pôle boréal d'un aimant, après un quart d'heure la couleur de la teinture devient d'un beau rouge dans les deux branches; cet effet n'est pas dû à l'altération spontanée du liquide, car ce liquide abandonné à lui-même passe au vert. Cette curieuse observation est due à M. l'abbé Rendu. Ritter avait déjà fait des expériences qui viennent à l'appui de celle qui précède; ce physicien avait remarqué qu'en plongeant dans de l'acide nitrique très-faible les extrémités d'un fil de fer aimanté, le pôle méridional était beaucoup plus fortement attaqué que le pôle septentrional. M. Muschamn, professeur à l'université de Christiania, a observé un phénomène de même nature, que nous allons rapporter. Après avoir mis au fond d'un tube courbé en U une certaine quantité de mercure, insuffisante pour fermer la communication des deux branches, il versa dans le tube une forte dissolution de nitrate d'argent; ce liquide se mit de niveau dans les deux tubes, et l'appareil fut abandonné à lui-même. Par hasard, le plan des deux branches du tube se trouva dans le plan du méridien magnétique, et l'on remarqua que l'argent précipité s'accumulait principalement dans la branche tournée vers le nord; l'expérience fut répétée, et donna plusieurs fois les mêmes résultats. En étendant du nitrate d'argent sur une

lame de verre autour de laquelle on avait pratiqué des rebords avec une matière grasse, et au centre de laquelle on avait placé une pièce de zinc arrondie, le métal précipité s'étendit plus vers le nord que dans toute autre direction; et, en plaçant le pôle sud d'un aimant dans le voisinage de la plaque, à 5 centimètres de distance, l'argent précipité se porta vers ce pôle avec beaucoup de rapidité, et la précipitation se fit dans un temps quatre fois moins long que quand l'aimant était éloigné.

§ 7. *Effets produits par les courants sur les corps organisés.*

1127. En parlant de la pile de Volta, il a été question des contractions qu'on éprouve lorsqu'on met les deux mains en contact avec les pôles d'une pile, directement ou par l'intermédiaire de corps plus ou moins bons conducteurs; mais il nous reste beaucoup de détails à donner sur la nature de ces effets, et sur ceux qu'on produit dans les cadavres récents et dans les végétaux.

Lorsqu'on touche les extrémités d'une pile avec les mains préalablement mouillées, on éprouve une commotion qui s'étend jusqu'au poignet ou jusqu'au coude, suivant l'intensité de la pile; les effets sont plus marqués lorsqu'on tient avec les mains mouillées de gros cylindres métalliques, communiquant avec les plaques polaires. On peut graduer à volonté la commotion en embrassant un nombre croissant d'éléments. Lorsque plusieurs personnes se tiennent par les mains de manière à former une chaîne continue dont les deux extrémités sont en contact avec les pôles de la pile, toutes éprouvent la même commotion; mais elle diminue rapidement avec le nombre des personnes interposées dans le circuit. Ces effets dépendent surtout du nombre des éléments de la pile, et beaucoup moins de leur étendue : car une pile composée de douze paires de $5^m,27$ carrés de surface ne donne que de très-faibles commotions, tandis qu'une pile de cinquante couples de 27 millimètres carrés de surface donne des commotions très-vives. Tant que la pile n'a qu'une centaine d'éléments qui n'excèdent pas 10 centimètres carrés, la commotion peut être reçue sans danger; mais il n'en serait pas de même si le nombre des éléments et l'étendue de leur surface étaient beaucoup plus considérables.

Les commotions ont lieu à l'instant où l'on ferme et où l'on ouvre le circuit; dans l'intervalle on éprouve une sensation continue, dont il est impossible de définir la nature.

1128. Les cadavres de l'homme et des animaux, peu de temps après la mort, et surtout ceux des animaux à sang froid, éprouvent par les courants électriques des contractions qui reproduisent tous les mouvements de la vie. Les limites dans lesquelles nous devons nous renfermer ne nous permettent pas d'exposer les nombreuses expériences qui ont été faites sur ce sujet; nous nous bornerons à rapporter quelques-uns des résultats les plus remarquables.

1129. Les contractions que les courants font naître dans les corps organisés peuvent également se produire par l'électricité de tension, ou par celle qui résulte de la chaleur et des actions chimiques; ces contractions ne paraissent se manifester que par l'intermédiaire des nerfs. Les nerfs, comme on sait, partent du cerveau et de la moelle épinière, se ramifient dans toutes les parties du corps, et viennent s'épanouir sous l'épiderme. Les cadavres de grenouilles récemment tuées sont d'une susceptibilité extrême, et éprouvent de vives contractions par les plus faibles décharges électriques; ces observations remontent à Galvani, et elles ont été la cause occasionnelle de la belle découverte de Volta.

1130. Pour préparer une grenouille destinée aux expériences galvaniques, on coupe avec des ciseaux la colonne vertébrale au-dessous des pattes de devant; en retournant la peau, on obtient de suite les cuisses écorchées surmontées d'une partie de la colonne vertébrale, ensuite on enlève les chairs de manière à laisser à nu les nerfs lombaires. Si on place la grenouille ainsi préparée à peu de distance d'une machine électrique en mouvement, et qu'on touche les nerfs avec un corps conducteur, à chaque étincelle tirée de la machine, les muscles sont fortement agités par l'effet du choc en retour : c'est la première observation de Galvani. En établissant la communication entre les nerfs lombaires et les cuisses par un arc composé de deux métaux, les muscles des cuisses éprouvent de vives agitations; elles cessent aussitôt que le courant est établi, et se reproduisent quand on interrompt le circuit. Lorsque la grenouille a été promptement préparée, et qu'elle était très-vive, on obtient des contractions très-prononcées en mettant directement les nerfs en contact avec les muscles. Lorsqu'un courant a passé quelque temps à travers une grenouille, elle ne se contracte plus quand on ouvre et qu'on ferme le circuit : l'affaiblissement de la sensibilité est d'autant plus considérable que le courant est plus fort. En changeant la direction du courant, l'excitabilité

reparaît. Le repos produit, en partie seulement, l'effet d'un courant opposé; mais après une heure et souvent moins, l'irritabilité a disparu sans retour. Il résulte des expériences de MM. Lehot, Bellingeri et Marianini, que quand un nerf déjà affaibli est excité par un courant, les muscles correspondants se contractent, pourvu que le courant soit dirigé dans le sens des ramifications nerveuses; mais alors aucune contraction ne se manifeste quand on ouvre le circuit; si le courant chemine en sens contraire, il ne se produit pas de contractions quand on ferme le circuit, mais elles se manifestent à l'ouverture. M. Nobili a reconnu que quand on touche les nerfs avec les muscles, il se produit un courant qui va des nerfs aux muscles, et qu'il existe des courants naturels dans les animaux; et M. Matteucci est parvenu à faire des piles électriques en réunissant des cadavres de grenouilles. Nous ne pourrions entrer dans plus de détails sans dépasser les limites d'un livre élémentaire. Nous renvoyons les lecteurs aux *Leçons sur les phénomènes physiques des corps vivants*, et au *Traité des phénomènes électro-physiologiques des animaux*, publiés récemment par M. Matteucci, qui a fait une étude spéciale des questions dont il s'agit.

1131. Par le même mode d'excitation on est parvenu à produire sur plusieurs espèces d'animaux des phénomènes extrêmement remarquables; nous en rapporterons quelques-uns. Une linotte était près d'expirer; ses yeux étaient fermés, et elle ne pouvait plus se tenir sur ses pattes; M. de Humboldt lui plaça une petite lame de zinc dans le bec et une lame d'argent dans le rectum; la communication fut établie par une tige de fer : à l'instant l'oiseau rouvrit les yeux, se releva sur ses pattes, battit des ailes, respira six à huit minutes, et expira ensuite. La tête d'un bœuf récemment tué étant placée sur une table, on établit la communication d'une des oreilles et des naseaux avec les pôles d'une pile : les yeux s'ouvrirent, les oreilles et la langue s'agitèrent (Galvani). En établissant la communication de la moelle épinière aux naseaux, les paupières s'ouvrirent complétement, et les yeux roulèrent dans leur orbite comme dans la plus violente fureur (Aldini).

Les expériences du docteur Ure sur le corps d'un pendu, immédiatement après l'exécution, avec une pile de 270 paires de 108 millimètres de côté, chargée avec de l'eau acidulée, sont également très-remarquables. En établissant la communication entre la moelle épinière de la première vertèbre cervicale et le nerf sciatique, les muscles du corps éprouvèrent de violentes convulsions; en faisant

mouvoir un des fils de la hanche au talon, la jambe, qui était pliée, fut lancée avec tant de force qu'elle faillit renverser un assistant, qui essayait en vain de s'opposer à son extension. Dans une autre expérience on parvint à produire les phénomènes de la respiration. Ayant établi la communication entre le talon et le nerf supra-orbital, tous les muscles de la face furent simultanément mis en mouvement, et exprimèrent d'une manière si effroyables la fureur, la rage, le désespoir, que plusieurs personnes furent obligées de quitter l'appartement.

1132. On a fait beaucoup d'expériences sur les effets thérapeutiques des courants de la pile; on a essayé principalement de guérir par ce moyen la goutte, les rhumatismes, les paralysies, etc., en faisant passer les courants à travers l'organe affecté, au moyen d'armatures métalliques placées de chaque côté. Plusieurs médecins continuent ces recherches, mais avec des appareils particuliers dont nous parlerons plus tard [1152]. On a quelquefois obtenu, comme avec l'électricité de tension, des résultats satisfaisants. Il est bien certain que l'électricité joue un grand rôle dans les phénomènes de la vie; mais il faut que nos connaissances à cet égard soient bien plus avancées, pour qu'on puisse avoir une marche assurée dans l'application de l'électricité aux différents cas pathologiques.

1133. Les plantes elles-mêmes sont irritables par les courants électriques, mais incomparablement moins que les animaux. Giulo, avec une pile de 50 paires, est parvenu à produire des mouvements dans la *mimosa sensitiva*, la *mimosa pudica* et la *mimosa asperata*. On a fait aussi beaucoup d'expériences pour reconnaître si l'électricité de tension favorisait la végétation. Les uns ont trouvé que l'influence était nulle; d'autres, que l'électricité favorisait la végétation, et l'électricité négative plus que la positive. Quelques considérations que nous allons rapporter viennent à l'appui de ces dernières expériences. Les graines, quand elles germent, les bourgeons, les feuilles et les racines, jouissent de la propriété d'expulser un acide qui paraît être de l'acide acétique; c'est probablement par cette raison que les acides nuisent à la végétation, et que les alcalis la favorisent, et pourquoi une plante placée au pôle négatif d'une pile végète avec plus d'activité. Il est probable que l'écoulement continuel de l'électricité négative de la terre par les aspérités des plantes favorise la végétation en facilitant leurs sécrétions acides.

Les courants d'une grande puissance désorganisent les matières végétales. Une feuille de laurier soumise pendant cinq jours à l'action d'une pile de 150 éléments devint brune et desséchée; la matière colorante verte, la résine, l'alcali et la chaux furent transportés au pôle négatif, et l'acide cyanydrique au pôle positif (Davy). Les courants agissent dans le même sens sur toutes les autres substances végétales.

Après avoir examiné les différentes classes d'effets produits par les courants voltaïques, nous allons étudier les diverses causes qui mettent l'électricité en mouvement, et les propriétés particulières que les courants présentent suivant leur origine.

§ 8. *Courants produits par l'influence d'autres courants ou des aimants, ou courants d'induction.*

1134. Les phénomènes remarquables dont il s'agit ont été découverts par M. Faraday en 1831, et étudiés depuis par un grand nombre de physiciens.

1135. *Courants produits par l'influence d'autres courants.* Supposons qu'on ait enroulé ensemble sur un cylindre de bois ou sur un tube de cuivre, deux fils de cuivre rouge A et B, recouverts de soie ou de coton. Si l'on met les extrémités de A en communication avec les pôles d'une pile, et les extrémités de B en contact avec les fils d'un rhéomètre, on remarque qu'à l'instant de la fermeture du circuit A, l'aiguille du rhéomètre est déviée, et qu'après quelques oscillations elle revient au zéro. Il en est de même quand on ouvre le circuit; mais la déviation a lieu en sens contraire de la première. Ainsi, quand on ferme ou quand on ouvre le circuit A, un courant d'une courte durée traverse le fil B. En observant la direction de ces deux courants, on reconnaît que dans le premier cas il est dirigé en sens contraire du courant de A, et que dans le second il est dirigé dans le même sens.

Les courants produits par influence portent le nom de courants d'induction. Ils peuvent être observés avec des fils de 2 ou 3 mètres de longueur, et de $0^{mm},5$ de diamètre, et un seul couple électromoteur ayant une surface de zinc de 2 à 3 décimètres carrés (M. Abria). Le rhéomètre doit être très-sensible, à fil gros et court: en augmentant la longueur du fil inducteur et le nombre des éléments de la pile, on augmente l'intensité des courants.

Les courants induits, quoique d'une très-courte durée, jouissent

de toutes les propriétés des courants permanents. Ils agissent sur l'aiguille aimantée comme nous venons de le dire; ils jouissent également de la propriété d'aimanter les aiguilles d'acier, et d'agir sur nos organes en produisant de vives commotions quand le corps fait partie du circuit.

L'aimantation des aiguilles placées dans une hélice est un moyen bien plus sensible que le rhéomètre, pour reconnaître l'existence de ces courants; mais le degré de leur aimantation ne peut servir de mesure à l'intensité des courants que quand les aiguilles, ayant la même trempe, ont des dimensions convenables pour l'hélice dont on se sert (M. Abria, *A. C. et P.*, t. I). Lorsqu'on emploie ce moyen d'observation, il est évident que l'aiguille ne doit être soumise qu'à l'action d'un seul des courants. Une chose très-remarquable, c'est que les deux courants induits qui produisent la même déviation de l'aiguille du rhéomètre, mais en sens contraire, aimantent inégalement des aiguilles égales placées dans la même hélice; le courant direct est plus puissant que le courant inverse, et le rapport de leurs effets n'est pas toujours le même.

1136. En mesurant l'intensité des courants induits par le degré d'aimantation que prennent des aiguilles égales de dimensions convenables placées dans la même hélice, M. Abria a constaté les lois suivantes : 1° quelles que soient les dimensions et les dispositions des deux circuits, les courants induits sont proportionnels aux courants inducteurs; 2° lorsque les circuits sont égaux, placés parallèlement ou enroulés ensemble en hélice ou en spirale, et que l'un d'eux est parcouru par un courant de la même intensité, les courants induits sont indépendants de la longueur commune des circuits; 3° les effets produits par des fils enroulés en hélice sont à peu près deux fois plus grands que quand ils sont placés parallèlement : dans le premier cas le courant direct est à peu près égal à $0^m,67$ du courant inducteur; 4° en augmentant la longueur du fil inducteur, ou en diminuant celle du fil induit, on augmente l'intensité des courants induits : les effets sont inverses quand les variations de longueur ont lieu en sens contraire; 5° toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité des courants induits est indépendante de la section du fil inducteur; 6° la partie du circuit induit non soumise, par son trop grand éloignement, à l'influence du fil inducteur, diminue l'effet; lorsque le fil a partout le même diamètre, l'intensité du courant induit est à celle qu'il aurait si sa longueur était réduite à celle qui est soumise à l'influence du courant inducteur, dans

le rapport inverse des longueurs des fils; 7° lorsqu'on emploie des fils tournés en spirales plates et étroites, qu'on place à différentes distances, les effets varient en raison inverse de la simple distance; quand les fils occupent une grande partie de la surface du cercle, le décroissement avec la distance est encore moins rapide; 8° en augmentant la section du fil induit, les deux courants augmentent, mais le courant inverse plus rapidement que le courant direct : ce dernier varie sensiblement comme la racine quatrième de la section. 9° Lorsque le fil induit est formé de plusieurs fils isolés et communiquant par leurs extrémités, le courant est un peu plus grand que celui qui serait produit si les fils étaient nus; probablement parce que, dans ce dernier cas, les réactions des courants les uns sur les autres, réactions qui diminuent l'effet produit, sont plus grandes à cause de la diminution de distance. 10° Dans tous les cas, les effets varient proportionnellement à la conductibilité du fil induit. Plusieurs de ces expériences ont été faites sur des spirales à un seul tour, pour éviter la réaction des éléments induits les uns sur les autres. La pile était à courant constant, et le courant du fil inducteur avait toujours la même intensité. Il paraîtrait, d'après tout ces faits, que l'intensité des courants induits provient de la somme des actions du courant inducteur sur tous les éléments du fil induit divisé par leur nombre.

1137. *Inductions de différents ordres.* Les courants d'induction agissent sur des circuits fermés pour y développer des courants de même nature : cette importante découverte est due à M. Henry de Penserton. Supposons qu'on ait placé sur une table une série de bobines sur lesquelles on ait enroulé deux fils isolés par de la soie, qu'on mette en communication les extrémités d'un des fils de la première bobine avec une pile, les extrémités du second fil avec les extrémités d'un des fils de la seconde, et ainsi de suite, et qu'on fasse communiquer entre eux les extrémités du dernier fil : on obtiendra ainsi une série de circuits fermés, très-voisins les uns des autres dans une partie de leur longueur. Si alors on ferme ou si on ouvre le premier circuit, il se produira des courants induits dans tous les circuits; mais ils seront alternativement de signes contraires et d'intensité décroissante avec le rang de l'induction. Les intensités des courants induits peuvent être mesurées par les degrés d'aimantation que prennent des aiguilles égales placées dans des hélices aussi égales faisant partie des divers circuits. On pourrait remplacer les hélices par des spirales; pour cela il faudrait placer les unes

à côté des autres une série de spirales doubles, A,A'; B,B'; C,C', etc., séparées par une plaque de verre : en supposant que le courant primitif parcourt la spirale A, placée au-dessous de A', il faudrait faire communiquer A' avec B, B' avec C, et ainsi de suite.

Si on place trois spires A, B, C, l'une sur l'autre, et qu'on fasse parcourir la spire A au courant primitif, le courant induit dans l'une quelconque des deux autres spires reste le même quand la troisième est ouverte; mais il éprouve une grande diminution si elle est fermée. Des plaques métalliques se comportent de la même manière qu'un circuit fermé, et elles agissent d'autant plus qu'elles sont plus épaisses. L'affaiblissement du courant induit, occasionné par le voisinage d'un circuit fermé ou d'une plaque métallique, provient, sans aucun doute, de ce que les deux circuits ou le circuit et la plaque sont induits simultanément, et que les courants qui y sont produits déterminent dans le circuit voisin des courants de troisième ordre de signe contraire, qui affaiblissent ceux du deuxième ordre qui y sont établis. Cette explication est justifiée pour les circuits, puisqu'ils n'agissent pas quand ils sont ouverts; elle l'est pour les plaques, par une expérience très-curieuse de M. Henry. D'après ce physicien, en enlevant un secteur d'une plaque de plomb qui, par son interposition avait beaucoup atténué les courants induits dans une spirale fermée, on obtint le même effet qu'en supprimant la plaque.

1138. M. Abria a fait sur le sujet dont il est question des expériences très-remarquables, qui conduisent nécessairement à reconnaître que les inductions de différents ordres ne sont pas instantanées. Si on prend trois spirales A, B, C, égales, superposées et très-rapprochées, et qu'on fasse passer un courant dans l'une quelconque, le courant induit dans l'une des deux autres a la même intensité, pourvu que l'autre soit ouverte. Ainsi, le courant primitif traversant A, B ou C sont également induites quand C ou B sont ouvertes. Mais si les spirales restent fermées, le courant induit dans C est beaucoup plus affaibli que celui qui se produit dans B. Ces phénomènes s'expliquent très-bien, en supposant les actions successives : car alors l'action de A ne peut se transmettre à C qu'après avoir traversé la spirale du milieu B; C reçoit alors simultanément l'action du courant principal et l'action contraire du courant de deuxième ordre induit dans B, tandis que la spirale B ne reçoit l'action contraire du courant de deuxième ordre induit dans C qu'un certain temps après avoir éprouvé l'action du courant principal A :

ce temps est égal à deux fois celui qui est nécessaire pour que l'action se transmette de B à C. L'inégalité que l'on observe dans les deux affaiblissements proviendrait de la différence entre les intervalles de temps qui séparent les actions contraires subies par chaque spirale induite, et en outre des intensités respectives des divers courants induits.

Jusqu'ici nous avons supposé que les intensités des courants induits étaient mesurés par l'aimantation des aiguilles; on obtient des résultats bien différents quand on emploie les rhéomètres. Nous avons déjà dit qu'alors les courants directs et inverses du premier ordre paraissent égaux; ceux des ordres suivants manifestent à peine leur présence au rhéomètre, quoiqu'ils soient très-sensibles par les effets d'aimantation; les courants induits du premier ordre n'éprouvent aucun affaiblissement par l'influence de spirales fermées ou de plaques métalliques autres que le fer doux. M. Abria a reconnu que, d'après les indications du rhéomètre, la quantité d'électricité développée par induction varie proportionnellement au nombre des éléments inducteurs et à la quantité d'électricité qui traverse chacun d'eux; qu'elle est en raison inverse de la longueur réduite du circuit induit, proportionnelle à la section des éléments induits, et la même dans chaque élément, que les fils soient juxtaposés ou séparés par une matière isolante.

D'après le même physicien, ces effets proviennent probablement de ce que l'action du courant sur l'aiguille aimantée, et, par suite, la déviation de celle-ci, dépendent seulement de la quantité absolue d'électricité développée, et nullement de la durée de la perturbation, pourvu qu'elle soit très-courte.

Les actions qui se produisent entre deux circuits isolés se manifestent également entre les éléments d'un même circuit; et c'est principalement à ces actions qu'est due la diminution d'effet qu'on observe dans une spirale soumise à l'induction, et dont on augmente progressivement le nombre des tours. Cette diminution a lieu suivant une loi moins rapide que le nombre des tours, c'est-à-dire que le nombre des éléments.

1139. Nous avons dit précédemment que, quand les deux spirales inductrices et induites, ou les deux hélices, étaient égales, un courant inducteur d'une même intensité produisait des courants induits d'une intensité beaucoup plus grande que si les deux circuits étaient en ligne droite. Cette augmentation d'intensité résultant du rapprochement des fils, ne tient pas seulement à ce qu'un plus grand

nombre d'éléments du fil inducteur agissent sur chaque élément du fil induit, car le nombre des éléments du fil induit qui réagissent les uns sur les autres est le même; mais à ce que le fil inducteur agit proportionnellement au nombre de ses éléments, et que les réactions des fils induits suivent une loi moins rapide : alors la cause qui tend à augmenter la quantité d'électricité est plus influente que celle qui tend à la diminuer. Sans cette réaction, l'intensité du courant induit direct, qui, dans le cas de fils très-rapprochés roulés en hélice, est au plus le double de ce qu'elle est dans le cas où ces mêmes fils sont tendus en ligne droite, serait beaucoup plus considérable, à cause de la lenteur avec laquelle l'action décroît quand la distance augmente.

1140. *Courants qui se produisent dans le fil inducteur lui-même quand on ouvre le circuit.* Considérons un circuit fermé renfermant une pile, et un petit circuit latéral communiquant avec les extrémités du fil voisines des pôles et renfermant un rhéomètre. Une faible partie du courant général passera dans le circuit latéral et fera dévier l'aiguille; mais, au moyen d'un aimant convenablement placé, on la maintiendra facilement à zéro. Si alors on ouvre le circuit principal à un des pôles de la pile, on verra au mouvement de l'aiguille que le circuit fermé dans laquelle la pile n'entre plus est parcouru par un courant momentané dans la même direction que le courant principal. On appelle *extra-courant* le courant qui se produit dans un circuit à l'instant où l'on supprime sa communication avec la pile. M. Abria, en employant des spirales de gros fils, a trouvé que l'extra-courant était à peu près les 0,72 du courant principal, et que le rapport ne variait pas beaucoup avec la longueur et la section de la spirale.

1141. *Courants d'induction produits par le mouvement d'un circuit parcouru par un courant permanent.* Imaginons qu'un très-long fil couvert de soie ou de coton, soit plié en zigzag sur une planche, et que ses extrémités communiquent avec une pile; que sur une autre planche un autre fil plié de la même manière communique avec un rhéomètre très-sensible. Les deux planches étant parallèles, si toutes deux sont fixes, l'aiguille du rhéomètre reste immobile; mais si l'on fait mouvoir l'une des deux planches parallèlement à elle-même, un courant permanent, mais d'intensité variable, se produit dans le fil communiquant avec le rhéomètre. Le courant a des directions contraires quand on approche ou quand on éloigne les planches, et son intensité augmente avec leur rapprochement et

diminue avec leur éloignement. Par le rapprochement, le courant induit est inverse, il est direct par l'éloignement. Cette belle expérience est encore due à M. Faraday.

Il résulte de là une conséquence importante. Considérons deux fils parallèles AB et CD (fig. 1007); supposons que AB soit fixe et parcouru par un courant permanent dans la direction AB; GH étant une perpendiculaire commune aux deux fils, imaginons que CD tourne autour du point H dans un plan perpendiculaire à GH, et que le point D s'abaisse au-dessous du plan de la figure: l'effet produit sera le même que si CD s'éloignait de AB; ainsi CD sera parcouru par un courant direct. Quand CD sera perpendiculaire à AB et qu'il continuera son mouvement, l'effet produit sera le même que s'il se rapprochait de AB: ainsi le courant sera inverse; mais, comme CD a changé de direction, il aura encore la même direction dans le fil. Le fil étant revenu à sa position primitive, si on continue le mouvement dans le même sens, il se produira un courant direct, mais qui, à cause du renversement du fil, aura une direction contraire au premier, et il en sera de même du courant qui se produira dans le dernier quart de tour. Ainsi, en faisant faire une révolution complète au fil CD, dans le premier demi-tour le courant induit sera direct, et dans le second il aura une direction contraire. Il est évident que les effets produits seraient les mêmes si le fil CD tournait en sens contraire. Il est important de remarquer que si le fil CD était perpendiculaire à AB, un mouvement quelconque de ce fil, qui le laisserait toujours perpendiculaire à AB, ne produirait point de courant induit, parce qu'il n'y aurait pas de raison pour qu'il fût dirigé dans un sens plutôt que dans le sens contraire.

M. Delezenne a vérifié ces conséquences du principe de M. Faraday. Pour cela il a pris deux bobines plates, couvertes chacune d'un long fil de cuivre; l'une d'elles pouvait facilement se placer et tourner sur elle-même dans la première. La première était fixe et communiquait avec un couple énergique; les extrémités du fil de la petite communiquaient avec un rhéomètre. Les deux bobines étant placées de manière à être concentriques, leurs axes sur la même ligne, en faisant glisser la bobine centrale parallèlement à elle-même de manière à laisser toujours son axe sur la même ligne, et en la ramenant à sa position primitive, il se produisait des courants directs et inverses comme dans l'expérience de Faraday. En faisant tourner la bobine centrale lentement et uniformément autour d'un de ses

diamètres, la déviation de l'aiguille du rhéomètre augmente pendant le premier quart de tour; elle diminue pendant le second quart, arrive au zéro à la fin du demi-tour, et change de direction dans le second. Mais, pour que dans cette expérience on ne puisse pas supposer que les effets observés proviennent du magnétisme terrestre, il faut placer l'axe commun des bobines perpendiculairement au méridien magnétique, et faire mouvoir la bobine centrale autour d'un diamètre parallèle à l'aiguille d'inclinaison, parce qu'alors les courants terrestres, étant perpendiculaires à ceux des fils, sont sans action sur eux. Au reste, dans toutes les positions possibles des bobines, il serait très-facile de reconnaître l'influence terrestre : il suffirait pour cela de répéter les expériences en supprimant la communication du fil de la grande bobine avec la pile. Quand les centres des bobines coïncident et que leurs axes sont perpendiculaires, il ne se produit point de courant, en ouvrant ou en fermant le circuit de la grande bobine, ni en faisant mouvoir la petite parallèlement à elle-même sur son axe, parce qu'alors les éléments voisins des fils sont perpendiculaires.

1142. *Influence du fer et des aimants.* Considérons une bobine à un seul fil dont les extrémités communiquent à un couple électromoteur faible, et supposons que le circuit renferme un rhéomètre. Lorsque l'aiguille sera stationnaire, introduisons une barre de fer doux dans la bobine : à l'instant la déviation du rhéomètre diminue momentanément et revient bientôt au point de départ si le barreau reste immobile; si alors on le retire, la déviation de l'aiguille augmente, et de la même quantité dont elle avait diminué. Le phénomène s'explique en considérant que le fer s'est aimanté sous l'influence du fil de la bobine, et que les courants dans le même sens qui se sont établis dans les éléments magnétiques ont agi sur le courant du fil, et y ont produit des effets d'induction de même nature que ceux qui seraient résultés de l'introduction, dans la bobine, d'une autre dont le fil aurait été parcouru par un courant dirigé dans le même sens.

Prenons maintenant une bobine à deux fils, dont l'un communique avec une pile et l'autre avec un rhéomètre. En ouvrant ou en fermant le circuit, l'aiguille est déviée en sens contraire et de quantités égales. Répétons ces expériences après avoir introduit un barreau de fer dans la bobine : les déviations ont encore lieu dans les mêmes sens; mais elles sont beaucoup plus considérables. On en conçoit facilement la raison : car le fer étant aimanté, ses

courants moléculaires agissent de la même manière que ceux de la bobine, et tout se passe comme si le fil de la bobine avait une action plus puissante. Dans ces dernières expériences, il y a une particularité que nous ne devons pas omettre : le courant direct produit moins de déviation que le courant inverse : cet effet provient probablement de ce que le fer acquiert l'état magnétique plus rapidement qu'il ne le perd, et, par conséquent, qu'à l'instant de la rupture le changement d'état du système n'a pas lieu aussi instantanément qu'à l'instant de la fermeture du circuit. L'acier agit comme le fer, mais avec moins d'énergie ; la raison en est dans sa force coercitive.

Prenons une bobine à un seul fil, dont les extrémités sont fixées à un rhéomètre, et qui est traversée par un barreau de fer : si on approche un des pôles d'un aimant d'une des extrémités du barreau, l'aiguille du rhéomètre est déviée; elle revient au zéro quand le pôle de l'aimant reste fixe, et elle se meut en sens contraire quand on l'éloigne. Si on amène rapidement le pôle en contact avec le barreau, et si ensuite on l'enlève brusquement, les déviations contraires sont égales. Dans cette expérience, il y a une influence directe de l'aimant sur le fil de la bobine, et on peut l'observer en remplaçant le barreau de fer par une barre de bois. On obtiendrait évidemment les mêmes résultats en approchant et en introduisant dans la bobine un barreau aimanté. Le sens du courant induit pendant l'introduction de l'aimant dépendrait évidemment du pôle qu'on présenterait à la bobine; mais le courant produit par son éloignement serait toujours contraire au premier, que l'aimant revienne sur lui-même ou qu'il passe à travers la bobine.

Les effets produits par les mouvements relatifs d'un aimant et d'une bobine sont évidemment les mêmes que ceux que nous avons reconnus entre deux bobines.

1143. Pour obtenir de plus grands effets, on prend un aimant en fer à cheval puissant, et une barre de fer ayant la même forme, dont les extrémités sont garnies de fils enroulés en sens contraire, et qui communiquent avec un rhéomètre : en approchant et éloignant successivement les extrémités du fer à cheval, on produit dans le circuit des courants intenses.

1144. On obtiendrait les mêmes effets en enroulant un fil autour d'un aimant en fer à cheval, et en approchant et éloignant successivement une plaque de fer parallèlement au plan qui passe par les extrémités de l'aimant. Dans ce cas, ce sont les variations

de l'état magnétique de l'aimant, occasionnées par la plaque de fer, qui produisent les courants.

1145. *Influence de la terre.* M. Faraday avait reconnu depuis longtemps des indices de l'action de la terre sur des circuits formés dont on fait varier la position. Depuis, M. Delezenne a imaginé une disposition qui donne des effets très-marqués. L'appareil se compose d'un grand châssis vertical en bois, qui reçoit un cadre carré en bois, mobile autour d'un axe horizontal; ce dernier porte un cerceau en bois d'environ un mètre de diamètre, mobile autour d'un axe perpendiculaire à celui du cadre rectangulaire. Cette disposition permet de donner à l'axe de rotation du cerceau une direction quelconque dans l'espace. Le cerceau est garni d'une gorge comme une poulie, et cette gorge est remplie par les spires d'un fil de cuivre couvert de coton, de 383 mètres de longueur, et de $1^m,2$ de diamètre, dont les extrémités communiquent avec les deux petits axes métalliques du cerceau, et ses derniers avec un rhéomètre très-sensible. On place l'axe de rotation du cerceau dans le méridien magnétique, et perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison.

On conçoit facilement, d'après cette disposition, que le cerceau en tournant sur son axe se trouvera dans les mêmes conditions qu'une hélice courte tournant autour d'un axe parallèle au plan d'une hélice fixe, traversée par un courant continu, puisque l'action de la terre peut être assimilée à celle de courants dirigés perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison. Le cercle étant d'abord perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, et tournant uniformement et lentement de manière à faire successivement huit mouvements de 45° chacun, on a obtenu successivement dans le rhéomètre les déviations suivantes, qui sont les moyennes de six expériences :

14,5	31	31,2	13,8	14	30,7	14
Ouest.	Ouest.	Ouest.	Ouest.	Est.	Est.	Est.

Le sens et l'intensité de ces variations se concevront facilement d'après ce que nous avons dit [1441] : car, dès que le cerceau commence à se mouvoir, un courant direct le parcourt; l'intensité de ce courant croît jusqu'à l'angle de rotation de 90°, après quoi elle diminue jusqu'à 180°; le mouvement continuant, un courant inverse s'établit dans le fil, son intensité va en croissant jusqu'à 270°; et décroît ensuite pour devenir nul à 360°. Lorsque l'axe de rotation du cerceau est parallèle à l'axe magnétique de la terre,

le mouvement du cerceau n'y produit aucun courant; ce qu'il était facile de prévoir, car les courants provenant de l'action inductive de la terre jouissent de toutes les propriétés des courants induits par les courants artificiels (M. Delezenne, *Mémoires de l'Académie de Lille*, 1845). Dans la même année, MM. Linari et Palmieri étaient arrivés aux mêmes résultats par une disposition analogue (*A. C. et P.*, t. VIII), et plus tard ils sont parvenus à obtenir des étincelles.

1146. *Des commotions et de la lumière produites par les courants induits.* Quand on ouvre un circuit renfermant une pile dont les pôles sont réunis par un fil court, il ne se produit au point de rupture qu'une faible étincelle, et si nos organes font partie du circuit on n'éprouve qu'une commotion peu sensible. Mais si le fil est long, tourné en spirale ou en hélice, et surtout si le tuyau sur lequel le fil est enroulé est occupé par un cylindre de fer, quand le circuit est entièrement métallique, il se produit au point de rupture une vive étincelle, et quand une partie du corps entre dans le circuit, on éprouve une forte commotion. Dans ce dernier cas, un rhéomètre qui ferait partie du circuit ne donnerait aucune indication, et une aiguille placée dans une hélice parcourue par l'extra-courant ne serait point aimantée.

Dans les mêmes circonstances, les commotions sont d'autant plus vives que le contact avec les mains est mieux établi. Pour cela on emploie des tubes de cuivre fermés par les deux bouts, et terminés par des fils de cuivre recouverts de soie et tournés en hélice; on fait communiquer les extrémités libres des fils avec deux points du circuit entre lesquels la rupture doit avoir lieu, et on tient les cylindres dans les mains préalablement mouillées. Lorsque les commotions sont très-faibles, on les rend plus sensibles en employant des plaques de cuivre garnies de fils, comme les tubes dont nous venons de parler, et qu'on met en communication avec les gencives supérieures et inférieures.

Pour faire l'expérience dont nous venons de parler, on dispose l'appareil comme dans la fig. 1008 : en faisant communiquer métalliquement les cylindres à commotion M et N, on obtient une déviation de l'aiguille et une faible étincelle au point de rupture; si on tient dans les mains les deux cylindres M et N, il n'y a plus de déviation au point de rupture, et on éprouve une forte commotion. Une colonne d'eau et en général un corps mauvais conducteur agissent comme le corps humain.

En employant un seul élément faible et une hélice à fil gros et court, on obtient à l'instant de la rupture de vives étincelles et de faibles commotions; en augmentant la longueur du fil, l'élément électro-moteur restant le même, les étincelles deviennent moins vives et les commotions plus fortes, mais jusqu'à une certaine longueur. En augmentant le nombre des éléments, les effets restent les mêmes; mais si on augmente en même temps la longueur du fil, les commotions deviennent plus vives et les étincelles très-brillantes.

1147. Les secousses qui se produisent dans les circonstances dont nous venons de parler peuvent être rapprochées et multipliées au moyen d'une disposition imaginée par M. Masson. Une roue dentée métallique dont les intervalles des dents sont remplis par du bois est fixée à un axe aussi métallique, qui tourne horizontalement entre deux coussinets au moyen d'une manivelle. Sur l'axe de rotation s'appuie un ressort en cuivre en communication avec un des pôles de la pile; un autre ressort s'appuie sur les dents de la roue et communique avec l'autre pôle de la pile. Par cette disposition, en tournant la roue, on ferme le circuit quand le ressort qui presse la roue commence à toucher une dent métallique, et il est interrompu lorsqu'il la quitte. Si l'on fait communiquer deux cylindres à commotion, que l'on tient dans les mains humides, avec les deux ressorts, de manière que le circuit soit toujours fermé par le corps, quelle que soit la position du ressort sur les dents de la roue, et si on imprime un mouvement de rotation à la roue, on éprouve une suite de commotions d'autant plus vives que la rotation est plus rapide; et, quand la vitesse est très-grande, que le fil est très-long, qu'il est contourné autour d'un morceau de fer, on éprouve une contraction douloureuse, dont l'effet, indépendant de la volonté, est de ne pas permettre à l'expérimentateur d'abandonner les conducteurs métalliques qu'il tient; il les serre, au contraire, avec plus de force. Une pile d'un petit nombre d'éléments peut tuer un chat en quatre ou cinq minutes. Les muscles de l'animal sont dans un état de roideur extrême, que Nobili avait déjà observé sur les muscles des grenouilles qui avaient été tourmentées par de nombreuses décharges électriques. M. Masson a observé que la sensation n'augmente avec la vitesse de rotation que jusqu'à une certaine limite, au delà de laquelle elle diminue et finit par disparaître. Ce phénomène provient probablement de ce que le fer ne s'aimante pas et ne se désaimante pas instantanément.

1148. Les courants induits dans des circuits distincts, et ceux de différents ordres, produisent les mêmes phénomènes. Pour les observer, il suffit de placer dans le circuit induit deux plaques à commotion que l'on tient à la main ou que l'on met en contact avec les gencives. Pour observer l'étincelle, il faut ouvrir le circuit induit en même temps que le circuit inducteur. En augmentant la longueur du fil induit, contourné en hélice ou en spirale, les étincelles deviennent moins vives, le pouvoir magnétisant plus faible, et les commotions plus fortes. L'intensité des chocs atteint aussi sa limite pour une certaine longueur de fil d'autant plus grande que le diamètre du fil est plus considérable. Si l'on forme une spirale induite avec trois fils égaux isolés, la commotion d'un, de deux ou des trois circuits est la même, les autres restant ouverts; mais elle augmente lorsqu'on fait communiquer les circuits partiels, de manière à augmenter leur longueur et non leur section. M. Abria, en observant par les commotions l'influence d'un courant sur deux circuits voisins, est arrivé aux mêmes conséquences que par l'action des courants induits sur des aiguilles.

1149. Les courants induits par le mouvement des aimants naturels ou artificiels produisent également des étincelles et de vives commotions; la fig. 707 représente une disposition très-simple, au moyen de laquelle on peut produire les mouvements relatifs d'un aimant et d'un électro-aimant nécessaire à la production des courants induits. AB est un aimant puissant, courbé en fer à cheval, fixé à l'axe horizontal MN, auquel on peut imprimer un mouvement de rotation plus ou moins rapide à l'aide d'une manivelle; à une petite distance des extrémités de l'aimant se trouvent deux gros cylindres de fer doux, sur lesquels est enroulé en sens contraire un même fil de cuivre recouvert de soie, dont les extrémités sont en *m* et en *n*. Par la rotation de l'aimant, chacune des deux masses de fer doux sera alternativement aimantée en sens contraire; mais le courant qui passera dans le fil, en supposant ses deux extrémités *m* et *n* en contact, ne changera de signe qu'à chaque passage des pôles devant les cylindres de fer. En effet, un même pôle de l'aimant, en s'éloignant d'un des cylindres, produit dans le fil qui le recouvre un courant de même signe que celui qu'il développe ensuite dans le fil de l'autre cylindre quand il s'en approche, puisque les fils sont contournés en sens contraire sur les deux cylindres. Ainsi, il n'y a de changements dans le sens des courants qu'à chaque demi-révolution,

et à l'instant où les centres des barreaux aimantés passent devant les centres des cylindres de fer. Si l'on tient avec les mains mouillées les extrémités *m* et *n* du fil, on éprouve par la rotation de l'aimant des commotions qui se renouvellent à chaque demi-tour de rotation de l'aimant, dont l'effet augmente avec la vitesse de rotation, et qu'on ne supporterait pas impunément pendant quelques minutes. L'effet est beaucoup augmenté quand on tient dans les mains des cylindres à commotion communiquant avec les extrémités des fils. Il est évident qu'on pourrait rendre l'aimant fixe, et faire tourner les deux hélices, et que les barreaux de fer, au lieu d'être isolés, pourraient être réunis de manière à former un fer à cheval. Le sens du mouvement de rotation est sans influence, puisque les effets produits résultent seulement du rapprochement ou de l'éloignement des pôles de l'aimant et des hélices.

1150. Les effets de la machine que nous venons de décrire deviennent bien plus puissants quand le circuit métallique est interrompu à l'instant où les pôles de l'aimant et ceux du fer à cheval sont en regard, c'est-à-dire à l'instant du changement de signe du courant, parce qu'alors le changement est brusque, tandis qu'il n'a lieu que d'une manière continue dans la disposition que nous avons indiquée ; mais il faut alors que le circuit reste fermé par nos organes. Le maximum d'effet s'obtient quand l'interruption a lieu un peu plus loin, probablement à cause de la durée de la décharge.

1151. La disposition la plus simple pour interrompre la communication lorsque l'électro-aimant passe en face des pôles de l'aimant, consiste à fixer sur l'axe de rotation une douille en bois ou en ivoire, qui porte deux petits anneaux en cuivre séparés, concentriques à l'axe, et interrompus, sur une longueur de quelques millimètres, en deux points opposés correspondants aux centres des pôles, et qui communiquent chacun avec une des extrémités du fil ; deux fils de cuivre fixés au support de l'appareil et communiquant avec le reste du circuit s'appuient chacun sur une des douilles.

Par cette disposition, on a des courants qui changent périodiquement de direction ; mais il est facile de ne recueillir que les courants qui ont la même direction, ou de donner la même à tous les deux. Il est évident qu'en supprimant de chaque douille les moitiés correspondantes, on ne fera circuler que les courants de même sens. Pour utiliser les deux courants en leur donnant la même direction, la meilleure disposition est la suivante, qui est

due à M. Runcoff. Les douilles dont nous venons de parler n'en font qu'une seule, toujours interrompue suivant deux lignes opposées, parallèles à l'axe de rotation; mais chacune des moitiés communique avec une des extrémités du fil; de sorte qu'à chaque interruption, chaque fil élastique communique avec une autre extrémité du fil.

1152. La figure 1009 représente l'appareil électro-magnétique connu sous le nom de Clarke, construit par M. Runcoff. AB est un aimant fixé sur un plateau de bois; CD deux bobines de fil de cuivre recouvert de soie et de gomme laque, dont les extrémités viennent communiquer avec le commutateur fixé sur l'axe; E roue en fonte que l'on met en mouvement à l'aide d'une manivelle, et qui communique par une chaîne à la Vaucanson avec une roue plus petite fixée à l'axe des bobines. G et F sont des pièces de cuivre encastrées dans une pièce de bois, et sur laquelle on place les tiges élastiques qui s'appuient sur le commutateur. Pour produire la décomposition de l'eau et de fortes commotions, les bobines sont à fil fin et d'une grande longueur; pour tous les autres effets, on emploie des bobines à gros fil. C'est dans les orifices *a* et *b* qu'on place les conducteurs destinés à diriger les courants où ils doivent agir. En terminant ces fils par des cylindres qu'on tient dans les mains, on éprouve de fortes commotions; mais on a trouvé par expérience qu'il est plus avantageux d'employer la disposition indiquée fig. 1009 bis, parce que les contacts sont mieux établis. En faisant passer les courants à travers un voltamètre, on décompose l'eau; les gaz peuvent être séparés, si les courants élémentaires sont tous dirigés dans le même sens. Pour produire l'incandescence d'un fil, on emploie la disposition fig. 1010; enfin, pour produire des étincelles, l'axe des bobines est terminé par une douille métallique à deux pointes (fig. 1011), et on place au-dessous un petit godet métallique renfermant du mercure et communiquant avec l'autre extrémité du fil; les pointes, en approchant de sa surface, font jaillir de vives étincelles.

1153. Si l'on intercale dans le circuit un thermomètre métallique de Breguet (fig. 439), en faisant communiquer la partie supérieure de l'hélice avec une des extrémités du fil conducteur, et faisant plonger une aiguille verticale fixée à la partie inférieure de l'hélice dans un petit vase plein de mercure et en communication avec l'autre extrémité du conducteur, cet instrument indique une élévation de température qui augmente avec la rapidité de la succession des

courants. Lorsque la vitesse de rotation varie de manière que le nombre des courants alternatifs produits par seconde soit 2°, 10°, 20° ou 40°, les températures correspondantes du thermomètre sont 7°, 55°, 100° et 133°; avec une plus grande vitesse on parvient à rougir un fil de platine.

1154. Les effets chimiques sont soumis à la même influence : la quantité du corps décomposé augmente avec la vitesse de rotation, mais seulement jusqu'à une certaine limite au delà de laquelle elle diminue. Et ce qu'il y a de remarquable, c'est que le même nombre de courants produit d'autant plus d'effet que les courants se succèdent plus rapidement. Ainsi, quand les courants se succèdent de manière qu'il s'en forme 14, 28, 42, 48, 52 par seconde, il faut 1050, 462, 442, 400, 494 courants élémentaires pour produire la même quantité de gaz.

Il résulte de là que l'influence de la vitesse de rotation ne consiste pas seulement à produire un plus grand nombre de courants dans le même temps, mais à donner une plus grande intensité à chacun d'eux.

1155. La diminution d'intensité qu'éprouvent les courants électro-magnétiques en traversant des conducteurs métalliques ou liquides quand on augmente la longueur du conducteur est beaucoup plus grande que pour toutes les autres espèces de courants. Mais, chose très-remarquable, un fil d'un mètre de longueur composé de deux bouts égaux, l'un de fer, l'autre de cuivre, conduit moins bien qu'un fil de même longueur composé de quatre et même de huit bouts de fer et de cuivre; et de l'eau acidulée conduit aussi bien quand elle est interrompue par des diaphragmes métalliques que quand elle est continue.

1156. Lorsqu'on place dans le circuit des vases renfermant le même liquide acidulé, communiquant entre eux par des fils de platine et des lames du même métal, et un thermomètre métallique, la vitesse restant constante, le dégagement des gaz est beaucoup plus grand sur les fils que sur les lames; et si l'on enfonce progressivement les lames, la quantité de gaz qui se dégage sur les fils augmente, celle qui se dégage sur les plaques diminue, et la température indiquée par le thermomètre métallique augmente; enfin il arrive un point où le dégagement cesse sur les lames. A cet instant le thermomètre est parvenu à son maximum, ainsi que la quantité de gaz dégagée sur les fils : car, en enfonçant davantage les lames, la chaleur et la quantité de gaz dégagée sur les fils restent constantes.

Il semblerait d'après cela, que l'action chimique proviendrait de la résistance que le courant éprouve. Mais ces phénomènes sont encore sans explication satisfaisante, parce qu'ils tiennent à la nature même des courants d'induction, sur lesquels nous n'avons que des notions trop vagues.

1157. Si l'on intercale dans le circuit un vase plein d'eau acidulée et un fil métallique, de manière que le courant soit obligé de se diviser en deux parties, dont l'une suive l'eau et l'autre le fil, pour se réunir au delà et traverser un thermomètre métallique, en augmentant progressivement la longueur du fil, le thermomètre marque des températures qui augmentent et diminuent alternativement. Suivant M. de la Rive, ces phénomènes semblent indiquer que les courants se propagent par ondulations, et qu'il se produit des interférences qui augmentent ou diminuent l'intensité du courant suivant la différence de marche. Mais ils me paraissent s'expliquer par le seul fait de la propagation non instantanée des courants : car, si la différence de temps de la propagation dans les deux conducteurs est égale à l'intervalle qui sépare l'émission des deux courants consécutifs opposés, il est évident qu'ils se détruiront au delà, et que, si la différence est égale à deux fois cet intervalle, les courants seront dans le même sens. Ces expériences pourraient conduire à la détermination de la vitesse de propagation des courants dans les corps conducteurs.

1158. Lorsqu'on décompose de l'eau acidulée par un courant électro-magnétique à l'aide de fils de platine, en augmentant progressivement la vitesse, le dégagement du gaz diminue graduellement et finit par disparaître complétement, et en même temps la température indiquée par un thermomètre métallique placé dans le circuit augmente et devient stationnaire quand le dégagement a cessé. A cet instant, les fils de platine sont recouverts d'une matière noire, qui n'est autre chose que du platine très-divisé; l'or et le palladium présentent les mêmes phénomènes, ainsi que les métaux attaquables par les dissolutions conductrices, tels que le cuivre, l'argent et le plomb. M. de la Rive n'a pas pu reconnaître si l'absence du dégagement de gaz résultait de ce qu'il n'y avait point d'eau décomposée, ou de ce que les gaz, arrivant presque en même temps sur les surfaces métalliques, se recomposaient par l'influence de ces surfaces. Il me semble que l'on pourrait expliquer ce fait par le pouvoir absorbant des corps très-divisés : les gaz seraient absorbés à mesure de leur formation et se

combineraient. Quant à la cause qui produit cette couche métallique très-divisée, M. de la Rive pense qu'elle réside dans l'ébranlement que les molécules des métaux éprouvent par les courants dirigés en sens contraire qui se succèdent avec une grande rapidité. Plusieurs circonstances tendent à confirmer cette conjecture : 1° ce sont les métaux qui ont le plus de ténacité qui résistent le plus à cette désagrégation; 2° les ébranlements sont très-visibles quand on emploie du mercure pour conduire le courant dans un liquide; les mouvements vibratoires qu'il éprouve sont beaucoup plus grands que quand il sert de pôle négatif à un courant voltaïque. On voit aussi autour des fils métalliques, surtout autour des fils d'argent, quand ils plongent dans un liquide où ils conduisent les courants électro-magnétiques, une suite de vibrations qui partent de la surface immergée et se propagent dans le liquide. Les fils d'or et d'argent ne présentent ce phénomène que lorsqu'ils sont recouverts d'une couche d'or ou d'argent divisée et épaisse.

1159. Dans ce qui précède nous n'avons parlé que des courants induits par l'action magnétique du fer; mais les courants induits par l'action d'autres courants directs, ou induits eux-mêmes, jouissent des mêmes propriétés, comme M. Abria s'en est assuré. Les courants partiels étaient transformés en un courant continu par une disposition analogue à celle qui sera décrite au n° 1163. Pour observer la chaleur produite, l'appareil était disposé de la manière suivante : deux petits barreaux, l'un de bismuth, l'autre d'antimoine, soudés bout à bout, communiquaient par leurs extrémités libres au moyen de deux fils de cuivre, avec un rhéomètre très-sensible. La soudure était entourée d'un fil de cuivre recouvert de soie qui faisait partie du circuit induit. M. Abria a reconnu ainsi, que la chaleur produite était en raison directe du carré de l'intensité du courant principal, du carré du nombre d'éléments inducteurs et de la vitesse de la roue dentée, ou, ce qui revient au même, du nombre des courants induits par seconde. Ces lois sont les mêmes que pour les courants voltaïques. Le même physicien en employant trois spirales induites, formées d'un fil d'un demi-millimètre et de 500 mètres de longueur chacune, soumises à l'induction de quatre spirales courtes de gros fils, superposées de telle sorte que chacune des spirales induites se trouvait entre deux spirales inductrices, a obtenu, par une succession de courants directs, la décomposition de l'eau acidulée avec les gaz séparés.

MM. Masson et Breguet ont obtenu des effets de lumière très-

remarquables par l'extra-courant, et par les courants induits; la distance des points d'interruption a été portée jusqu'à $0^m,02$. Cette lumière présente la même circonstance que quand elle est produite par les machines ordinaires.

1160. *Influence de la présence du fer et d'autres métaux sur les courants d'induction.* M. Dore, à qui on doit des expériences fort importantes sur cet objet, emploie un instrument qu'il désigne sous le nom d'*inducteur différentiel.* Il est formé de deux tubes de verre égaux, recouverts d'un même nombre de tours d'un même fil de cuivre; les deux hélices font partie d'un circuit renfermant une pile hydro-électrique; deux autres hélices à fils plus fins et plus longs, parfaitement égales, environnent les deux premières, et leurs fils forment un circuit dans lequel les courants induits qui y sont produits lorsqu'un courant parcourt les deux premières, marchent en sens contraires. Ce dernier circuit est interrompu par des cylindres à commotion, ou par un rhéomètre, ou par une hélice, destinés à aimanter de petites aiguilles d'acier trempé. Il est évident, d'après cette disposition, que quand les hélices inductives seront libres, aucun effet ne sera produit; mais si l'on place différentes matières dans l'une d'elles ou dans toutes les deux, on obtiendra un effet résultant de la différence des actions de ces matières.

M. Dore a reconnu ainsi, 1° que, pour les effets observés au rhéomètre, le fer, la fonte, l'acier en masse ou en fils augmentent l'intensité du courant, mais surtout quand des métaux sont en fils; et que les métaux réputés pour être non magnétiques sont sans influence; 2° que, pour ce qui concerne les phénomènes physiologiques, l'intensité des effets augmente aussi par l'introduction d'une masse de fer dans une des hélices; mais il est incomparablement plus augmenté par un faisceau de fils découverts : car, en plaçant dans une des hélices un cylindre de fer, et dans l'autre des fils qui produisent le même effet sur le rhéomètre, c'est-à-dire qui, par la rupture ou la fermeture du circuit, laissent l'aiguille du rhéomètre en repos, en se plaçant dans le circuit, on éprouve une vive commotion; 3° que quand on enveloppe le faisceau de fils d'un cylindre conducteur non magnétique, on diminue beaucoup l'action physiologique du faisceau, sans que le rhéomètre indique cette influence. La propriété que possède le courant induit d'aimanter des aiguilles d'acier est tout à fait analogue aux propriétés physiologiques. M. Dore explique ces différents phénomènes en admettant :

1° que l'effet produit par la décharge de la même quantité d'électricité sur un organe est d'autant plus grand que le courant a une plus faible durée, ce qui est constaté, pour l'électricité statique, par la diminution des effets de la décharge d'une batterie, à mesure qu'on augmente la résistance que les électricités doivent vaincre pour se réunir; 2° que, sur une masse de fer, un courant d'induction agit toujours de deux manières différentes, en produisant une polarité et des courants comme dans tous les autres métaux; et que la polarité augmente l'effet produit, tandis que les courants la diminuent; 3° enfin que la polarité s'établit d'autant plus facilement et les courants d'autant plus difficilement que la masse de fer a plus de discontinuité parallèlement à l'axe.

1161. Cette influence des corps conducteurs et des métaux magnétiques, placés dans les hélices d'induction, se manifeste pour les inductions de tous les ordres.

1162. Elle existe aussi à un haut degré pour les effets physiologiques des extra-courants. Quand le fil qui réunit les pôles est tourné en hélice sur une bobine, et que l'hélice renferme un cylindre de fer ou un paquet de fil, par la rupture du circuit on obtient une vive étincelle et une forte commotion; elle disparaît en grande partie si le fer est enlevé, ou seulement environné d'un tuyau de cuivre.

1163. *Électricité statique produite par les courants directs et induits.* MM. Masson et Breguet sont parvenus à charger un condensateur par des courants induits en employant la disposition suivante. Au moyen d'une roue dentée et d'un commutateur, les courants d'induction se succèdent rapidement, et dans le même sens; une des extrémités du fil induit est en contact avec un des plateaux d'un condensateur, et l'autre est approché à une distance extrêmement petite du second; à l'instant où l'on aperçoit une étincelle, on éloigne ce fil, et le condensateur est chargé de l'espèce d'électricité qui convient au sens du mouvement.

La figure 1012 représente la disposition de l'appareil. MN est une bobine sur laquelle sont enroulés deux fils de cuivre isolés, de 650 mètres de longueur, et de $2^{mm},5$ de diamètre; à côté se trouvent cinq roues dentées, montées sur le même axe en fer, isolées, et dont les dents sont alternativement en verre et en métal. La première roue AB sert uniquement à interrompre le courant principal; les autres sont disposées de manière qu'une dent de cuivre dans les roues extrêmes soit vis-à-vis une dent de verre dans les roues du

milieu. Des lames de cuivre C'B', C"B",... frottent sur les roues et établissent les communications, de même que les petits ressorts n, n', n'',... qui passent sur des collets de cuivre des roues. Les lames de cuivre B'C', B"C", touchant alternativement des dents de cuivre et de verre, il est facile de voir comment on obtiendra toujours, dans le même sens en xy, les deux courants alternatifs d'induction. Supposons que le courant d'induction, au moment où l'on établit les communications, prenne la direction Mn^{iv}, il viendra dans la lame de cuivre ap; de là par n'', dans la roue dont la dent de cuivre touche la lame B"'C"', il passera dans la pièce métallique F'H', et, traversant xy, il suivra HF, C'B', R'M. Au moment où l'on interrompra les communications, le courant partant de N suivra la route N$a'p'$, n''C^{iv}, H'xy HC'aM. On a employé une pile de Daniell, dont le nombre des éléments n'a jamais dépassé quarante.

1164. *Courants produits dans des plaques métalliques mobiles par l'influence des aimants et de la terre.* Une plaque de cuivre circulaire verticale est mise en mouvement autour de son axe. L'axe de rotation, dans une certaine étendue, est couvert d'amalgame, ainsi que la circonférence du disque, et les deux extrémités du fil d'un multiplicateur sont en contact, l'une avec la partie de l'axe amalgamé, l'autre avec la circonférence du disque (fig. 708). Si on approche les pôles contraires de deux aimants de chaque côté du disque, en établissant le contact d'une des extrémités du fil du multiplicateur avec la circonférence précisément entre les deux pôles, le mouvement de rotation du disque produit dans le multiplicateur une déviation qui indique un courant dirigé de la circonférence au centre, ou du centre à la circonférence, suivant le sens de la rotation. Quand le contact a lieu à la circonférence du disque, en avant des pôles ou au delà, la rotation ayant lieu dans le même sens, les courants ont toujours la même direction, jusqu'à une distance de 50° à 60° de chaque côté des pôles magnétiques; mais le courant va en diminuant à mesure que le point de contact s'éloigne des pôles, et à des distances égales de part et d'autre il a la même intensité. En élevant davantage le disque, de manière que les pôles en regard s'éloignent de la circonférence, les mêmes effets sont produits. Si l'on met les deux extrémités du fil conducteur en contact avec la circonférence, de manière que, l'un d'eux étant entre les deux pôles (fig. 709), l'autre soit à droite ou à gauche, on obtient dans les deux cas des courants opposés. Quand les deux points de contact sont symétriquement placés par rapport aux pôles,

l'aiguille du multiplicateur est stationnaire. Ainsi la rotation du disque développe des courants dirigés suivant les rayons et la circonférence, et ces courants sont symétriquement placés par rapport au rayon qui passe entre les pôles (M. FARADAY).

La direction des courants dans le disque en mouvement donne une explication bien simple des phénomènes découverts par M. Arago [849]. En effet, quand l'aiguille est mobile et le disque en mouvement, on voit que chacun des courants produits tend à pousser l'aimant dans la même direction.

1165. MM. Nobili et Antinori ont cherché a déterminer d'une manière plus précise la direction des courants sur la surface des disques en mouvement. Ils ont employé la même méthode que M. Faraday; mais les extrémités du fil du multiplicateur étaient terminées par des pointes amalgamées, et pouvaient être appliquées sur les différents points de la surface du disque : ils ont trouvé ainsi la disposition des courants indiqués dans la fig. 710. Or, il est facile de voir, à l'inspection de la figure, que les courants placés en R et R′ exercent des actions répulsives sur les courants les plus voisins qui circulent dans l'aimant, et que les courants placés en A et A′ exercent au contraire une action attractive sur les courants les plus voisins. Quant à ceux qui sont compris dans la zone qui passe sous l'aimant, leur intensité doit aller en décroissant à mesure qu'ils s'approchent du milieu de l'aimant, puisque les courants sont de signe contraire entre l'aimant et la circonférence, et entre l'aimant et le centre; mais leurs effets sont encore dans le même sens, comme il est facile de le reconnaître. En effet, soit *abcd* (fig. 711) l'aimant, *mn* un courant plus voisin du point *b* que du point *c*, le courant sera dirigé comme l'indique la flèche; si on prend un point *b′* tel que $mb' = mb$, les actions du courant *mn* sur les parties *bm* et *mb′* se détruiront, et il restera une action dirigée dans le sens de celle des courants les plus voisins *ab* et *b′c*, qui est répulsive; la même chose aurait évidemment lieu, si le point *m* était plus voisin de *c* que de *b*, et pour les courants qui se trouvent de l'autre côté.

De cette disposition des courants résultent nécessairement les trois composantes de la force qui sollicite une aiguille soumise à l'influence d'un disque en mouvement [850]. En effet, la première résulte de ce que les forces attractives résident dans les parties du disque qui s'éloignent, et les forces répulsives dans les parties du disque qui s'approchent de l'aimant; et comme MM. Nobili et An-

tinori ont reconnu que ces dernières envahissent le disque jusque sous l'aimant; de sorte qu'elles s'étendent au delà du rayon qui passe par le centre de l'aimant, elles l'emportent sur les forces attractives qui s'exercent de plus loin et plus obliquement : de là l'origine de la composante perpendiculaire au disque, et qui tend à éloigner le pôle du disque. Quant à la force dirigée suivant le rayon, il est facile de voir que, quand l'aimant est près de la circonférence, tous les points répulsifs étant d'un seul côté par rapport à la ligne passant par le centre de l'aimant et perpendiculaire au rayon du disque, la résultante des forces répulsives sera oblique au rayon, et donnera une composante dans cette direction qui agira du centre à la circonférence; mais, à mesure que l'aimant se rapprochera du centre, les points répulsifs seront placés de chaque côté de la ligne perpendiculaire au rayon, la résultante se rapprochera de la normale au disque, et il existera une distance de l'aimant au centre pour laquelle la résultante sera exactement perpendiculaire au rayon : au delà, la composante parallèle au rayon s'inclinera en sens contraire; mais elle deviendra nulle de nouveau quand l'aimant sera au centre du disque.

Il est important de remarquer que, dans les expériences de M. Faraday comme dans celles de MM. Nobili et Antinori, on n'obtient que l'indication de certaines parties des courbes parcourues par les courants, courbes qui sont complétement inconnues, mais dont il faudrait connaître la forme et la position pour déterminer exactement l'effet produit sur l'aiguille, attendu que cet effet résulte de l'action totale des éléments de tous les courants.

1166. Il résulte évidemment des expériences de M. Faraday que, si un disque tournant était soumis à l'action de deux pôles magnétiques contraires, placés dans le plan de rotation et dans la direction d'un même diamètre, il se produirait des courants dirigés suivant les diamètres, et dont le sens dépendrait de celui de la rotation. Or, comme l'action de la terre peut être assimilée à celle de deux pôles magnétiques dirigés suivant la ligne d'inclinaison, on conçoit que, si l'on fait tourner un disque autour d'un axe perpendiculaire à son plan, à la ligne d'inclinaison et dans le méridien magnétique, il devra se produire des courants dans le disque, qui pourront être observés en approchant de ses bords une aiguille aimantée astatique; c'est ce que M. Faraday a vérifié par des expériences multipliées. Mais, si l'on incline l'axe de rotation, l'effet produit diminue, et finit par disparaître complétement lorsque sa

direction coïncide avec celle de l'inclinaison : car alors l'effet doit être le même que quand le pôle d'un aimant est au centre de rotation. Une autre conséquence très-importante, c'est que, si le disque était remplacé par un globe creux, les courants devraient être dirigés suivant les méridiens, puisque les courants sont toujours perpendiculaires à la direction du mouvement. M. Faraday a encore vérifié ce fait, et il a trouvé que les déviations d'une aiguille aimantée astatique étaient les mêmes que celles que M. Barlow avait trouvées par la rotation d'une bombe : ainsi ces derniers phénomènes sont, sans aucun doute, le résultat de l'action inductive de la terre.

Les phénomènes dont nous venons de parler tendraient à faire croire que tous les corps sont magnétiques, et viendraient à l'appui des expériences faites sur cet objet par Coulomb, M. Becquerel, et récemment par M. Haldat et M. E. Becquerel.

§ 9. *Développement des courants électriques par la chaleur.*

1167. En 1821, le docteur Seebeck, professeur à Hall, découvrit dans la chaleur une nouvelle cause de production de l'électricité. L'appareil employé par ce physicien consistait en un circuit fermé, composé de deux métaux différents : en maintenant les deux soudures à des températures différentes, un courant électrique parcourait le circuit. Depuis, M. Becquerel est parvenu à produire un courant dans un circuit formé d'un seul métal. Nous commencerons par exposer ces derniers phénomènes, comme les plus simples.

1168. *Courants développés dans un circuit formé d'un seul métal.* Soit *abc* (fig. 712) un circuit fermé composé d'un fil de platine dont les extrémités sont soudées aux deux bouts du fil d'un rhéomètre multiplicateur : si on élève la température d'une partie quelconque, il ne se manifeste aucun courant; mais, si l'on fait en O un nœud ou une petite hélice, et que l'on porte le foyer de chaleur à peu de distance en F, il se produit aussitôt un courant électrique dont la direction indique que l'électricité positive marche vers le point O. Un fil de palladium se comporte comme un fil de platine, un fil d'or ne produit point d'effet, un fil d'argent, ainsi qu'un fil de cuivre, un effet très-faible. Ces courants paraissent provenir d'une différence dans la propagation de la chaleur, occasionnée par la petite masse métallique placée en O. On peut aussi

développer des courants thermo-électriques dans un fil continu de fer ou de cuivre, d'or ou de platine, d'un diamètre constant, lorsque ses différentes parties n'ont pas le même degré de trempe ou de recuit, probablement parce que ces différences en produisent dans la faculté conductrice pour la chaleur. Si l'on fait communiquer deux fils de même nature et de même section avec les extrémités d'un rhéomètre, en chauffant une des extrémités libres des fils et les mettant en contact, il se produit un courant.

On peut produire les mêmes phénomènes avec un fil discontinu. Si l'on forme une spire à une des extrémités d'un fil, et qu'après l'avoir chauffée, on la mette en contact avec l'autre bout, ou si l'on réunit les deux bouts par un crochet, en appliquant la chaleur d'un seul côté, il se produit un courant dont la direction indique que l'électricité positive passe du côté du fil qui s'échauffe le plus difficilement : ainsi le courant va du chaud au froid. Avec un fil de cuivre il n'y a de courants qu'autant que l'un des bouts du fil est oxydé ou couvert d'une couche très-mince de mercure, d'or, d'étain d'argent. L'or et l'argent, quand ils ne sont pas purs, se comportent comme le cuivre. Les métaux oxydables, tels que l'antimoine, le fer et le zinc, présentent des effets inverses : le courant va de la partie froide à la partie chaude; le plomb et l'étain donnent des effets variables. Ces anomalies ne tiennent pas à une action chimique, car elles se produisent dans l'huile parfaitement privée d'air. Certains métaux en fil sans discontinuité et sans protubérances, tels que le fer, donnent naissance à des courants lorsqu'une partie quelconque a été préalablement recuite, et qu'on applique la chaleur en un point quelconque. M. Seebeck a reconnu qu'il se produit également des courants dans des anneaux fondus de bismuth et d'antimoine quand on refroidit une moitié et qu'on élève la température de l'autre; M. Sturgeon a constaté dans les cadres de ces deux métaux que certains points chauffés produisaient des courants, les uns dans un sens, les autres dans un autre, et que les points neutres, ceux qui ne produisent point de courants, sont ceux où la matière a dû commencer à se refroidir. Ce même physicien a reconnu des courants dans des barreaux cylindriques et coniques de ces deux métaux : avec un cône d'antimoine fondu, les courants étaient dirigés de haut en bas, ou de bas en haut, suivant qu'on refroidissait ou qu'on échauffait la base. Tous les métaux possèdent des propriétés thermo-électriques analogues, pourvu qu'ils soient en grandes masses. Il est probable que ces phénomènes proviennent

du défaut d'homogénéité des masses relativement à leur état cristallin.

1169. *Courant produit dans un circuit formé de plusieurs métaux.* L'appareil employé par M. Seebeck se compose (fig. 713) d'un cylindre de bismuth ou d'antimoine *ab*, aux deux extrémités duquel on a soudé une lame de cuivre deux fois recourbée. La partie *cd* est environnée de soie, afin que l'on puisse la tenir à la main. Ce circuit, dans son état naturel, n'a aucune action sur une aiguille aimantée; mais, si l'on chauffe une des soudures *a* ou *b*, il s'établit un courant électrique dont on peut facilement constater l'existence et la direction en présentant un des côtés du rectangle à une aiguille aimantée; ce courant va en s'affaiblissant jusqu'à ce que les deux soudures se retrouvent à la même température. Il suffit, pour produire ce phénomène, de présenter pendant quelques instants une des soudures à la flamme d'une bougie ou à un corps chaud quelconque, ou de la toucher avec la main. Si c'est la soudure *a* qui a été échauffée, le courant va dans le sens *baod*; et, si c'est la soudure *b* dont on a élevé la température, le courant va dans le sens *abdc*. Le même effet a lieu en refroidissant une des soudures. En général, le courant s'établit aussitôt que les deux soudures ne se trouvent pas à la même température.

On peut aussi se servir d'un rhéomètre multiplicateur à fil court, en mettant en communication avec ses extrémités deux fils de cuivre, dont les autres extrémités sont soudées à un cylindre de bismuth ou d'antimoine : la chaleur de la main est suffisante pour produire une grande déviation. On peut aussi se contenter d'enrouler aux extrémités du fil du multiplicateur les extrémités d'un fil de fer : en appliquant les doigts à une des jonctions on obtient des déviations qui, pour les rhéomètres très-sensibles, peuvent s'élever jusqu'à 70° et même 80°.

1170. En formant des circuits avec différents métaux, on a pu les ranger dans l'ordre de leur propriété thermo-électrique. Dans les deux tableaux qui suivent, chaque métal est positif par rapport à celui qui précède, et négatif relativement à ceux qui suivent. Le premier est de M. Cumming; le second de M. Becquerel.

Bismuth, mercure, nickel, platine, palladium, cobalt, manganèse, argent, étain, plomb, rhodium, laiton, cuivre, or, zinc, charbon, plombagine, fer, arsenic, antimoine.

Bismuth, platine, plomb, étain, cuivre, or, argent, zinc, fer, antimoine.

1171. On doit à M. Becquerel la découverte de plusieurs faits très-importants que nous allons rapporter.

1°. L'effet produit est le même quand les métaux sont immédiatement en contact ou séparés par une soudure quelconque homogène, ou par plusieurs métaux intermédiaires, pourvu que l'arc de communication soit également échauffé. On démontre ce fait au moyen du circuit fig. 714, dans lequel le cuivre et le fer sont en contact au point *a*, et séparés par des fils de platine, de cuivre ou d'étain. En chauffant seulement le point *a*, ou simultanément les points *a, b, c, d, e,* à la même température, tous les autres conservant la température initiale, on obtient la même déviation.

2°. Lorsque les deux soudures d'un circuit fer et cuivre sont maintenues à différentes températures, l'intensité du courant est égale à la différence des intensités des deux courants qui seraient produits si une des deux soudures était à zéro, et non, comme on aurait pu le penser, à l'intensité du courant résultant de la différence des températures.

3°. Dans un circuit fer et cuivre, l'une des soudures étant à zéro, et la température de l'autre croissant progressivement, l'intensité du courant ne croît pas proportionnellement à la température : à 300° l'accroissement est à peine sensible; au delà, l'intensité décroît, et change de signe au rouge sombre. Dans un circuit zinc et argent, la déviation maximum a lieu à 120°; elle est nulle à 225°, et au delà elle change de signe. Dans un circuit zinc et or elle est nulle à 150°, et change de signe à une température plus élevée. Les circuits fer et cuivre de même longueur produisent toujours les mêmes effets, quels que soient le diamètre des fils et le mode de contact, c'est-à-dire qu'il y ait soudure ou réunion par une forte pression. Avec les circuits zinc et argent, zinc et or, on obtient des résultats différents, suivant le diamètre des fils et le mode de contact.

4°. Pour des circuits fer et argent, fer et cuivre, cuivre et platine, argent et étain, cuivre et argent, les intensités des courants sont proportionnelles à la température d'une des soudures au moins jusqu'à 40°, l'autre étant à zéro. Cette propriété est importante, car on peut s'en servir pour graduer avec une grande facilité les rhéomètres multiplicateurs : il suffit pour cela de souder aux extrémités du fil de cuivre de l'instrument les extrémités d'un fil de fer, de plonger une des soudures dans de la glace fondante, et l'autre dans de l'eau à 40°, et d'observer les déviations correspon-

dantes aux températures de l'eau pendant son refroidissement : on obtiendra les déviations correspondantes à des intensités représentées par la température de l'eau.

5°. Enfin M. Becquerel est parvenu, au moyen des expériences que nous allons rapporter, à déterminer avec une grande probabilité, les rapports des pouvoirs thermo-électriques des différents métaux.

Pour reconnaître les rapports d'intensité des courants thermo-électriques produits par différents métaux, M. Becquerel soudait, bout à bout, des fils des métaux sur lesquels il voulait opérer ; les deux extrémités de cette chaîne étaient elles-mêmes soudées aux extrémités du fil du rhéomètre, et il élevait la température de la soudure où se trouvaient les deux métaux dont il voulait mesurer le pouvoir thermo-électrique. Par cette disposition la conductibilité de l'appareil restait constante et les résultats étaient comparables.

Voici le résultat des expériences ; une des soudures a été élevée à 20°, et toutes les autres ont été maintenues à 0°.

Désignation des soudures.		Intensité du courant.
+	—	
Fer	étain	31,24
+	—	
Cuivre	platine	8,55
+	—	
Fer	cuivre	27,96
+	—	
Argent	cuivre	2,00
+	—	
Fer	argent	26,20
+	—	
Fer	platine	36,07
+	—	
Cuivre	étain	3,50
+	—	
Zinc	cuivre	1,00
+	—	
Argent	or	0,50

Il résulte de ce tableau que, pour une température donnée de 20°, chaque métal acquiert une puissance ou action thermo-électrique telle que l'intensité du courant électrique que l'on obtient par l'élévation de température d'une soudure est égale à la différence des quantités qui représentent chacune de ses actions.

Par exemple, pour le fer et le cuivre, en désignant par P cette action ou cette puissance, on a P fer — P cuivre = 27,96 pour l'intensité du courant lorsqu'on élève la soudure fer et cuivre à 20°; de même pour le platine et le fer, P fer — P platine = 36,07. En retranchant la première de la seconde on a P cuivre — P platine = 8,11 : or, l'expérience donne 8,55, qui en diffère peu. Il est donc bien démontré que l'intensité d'un courant thermo-électrique est égal à la différence des actions thermo-électriques produites dans chaque métal par la même température. Alors, si l'on représente par x le pouvoir thermo-électrique du fer à 20°, on aura pour les autres pouvoirs thermo-électriques les valeurs suivantes :

P fer	$= x$
P argent	$= x - 26,20$
P or	$= x - 26,70$
P zinc	$= x - 26,96$
P cuivre	$= x - 27,96$
P étain	$= x - 31,24$
P platine	$= x - 36,00$

Dans cet arrangement chaque métal est positif par rapport à ceux qui le suivent, et négatif relativement à ceux qui le précèdent.

On voit, d'après ce tableau, que les pouvoirs thermo-électriques de l'argent, de l'or, du zinc et du cuivre sont à peu près égaux : or, parmi les différentes propriétés calorifiques de ces métaux, la seule qui présente les mêmes rapports, c'est la faculté rayonnante. Si cette conjecture se vérifiait, il faudrait admettre que dans le contact de deux métaux différents, le rayonnement de chaque surface est le même que dans l'air, et que la différence des pouvoirs rayonnants détermine le sens et l'intensité du courant. En admettant cette hypothèse, on pourrait déterminer la valeur de x par le rapport connu des facultés rayonnantes : par exemple, d'après Leslie, le rapport du rayonnement du fer et de l'or est 15 : 12. On aurait alors la proportion

$$x : x - 26,70 :: 15 : 12.$$

Les pouvoirs thermo-électriques des métaux seraient alors représentés par les nombres suivants :

Fer.....	133,50	Cuivre.....	105,54
Argent.....	107,30	Étain.....	102,26
Or.....	106,80	Platine.....	97,50
Zinc.....	106,54		

Ces nombres se rapportent à une conductibilité électrique déterminée et à une certaine température ; mais leur rapport est indépendant et de la température et de la conductibilité du circuit : car chacun d'eux varie proportionnellement à ces deux éléments, mais pour la température jusqu'à une certaine limite seulement.

M. Becquerel a reconnu que ces nombres sont aussi indépendants du plus ou moins de chaleur, et du refroidissement dans l'air de la partie des fils situés au dehors de la source de chaleur. Pour cela, il fallait former un circuit de plusieurs fils alternatifs de fer et de cuivre n'ayant pas les mêmes dimensions en longueur et en grosseur, élever successivement la température de chaque soudure au même degré, toutes les autres étant à zéro, et voir quelles étaient les intensités des courants : l'expérience a constaté que les intensités étaient égales.

M. Becquerel a fait une vérification très-remarquable des nombres relatifs au pouvoir thermo-électrique des métaux. On sait que, quand la température est la même dans toutes les parties d'un circuit composé de fils de différents métaux, le courant est nul : il faut donc que la somme des nombres qui représentent l'intensité des courants, pris chacun avec leurs signes, soit égale à zéro : or, c'est à quoi les nombres trouvés satisfont parfaitement.

Prenons, par exemple, le circuit fer, platine, argent, cuivre, et affectons du signe + l'intensité du courant qui va à droite : en désignant par A, B, C, D les courants développés aux quatre soudures, on aura

A (fer, platine)	=	133,50	— 97,50	=	36,00
B (platine, argent)	=	97,50	— 107,30	=	— 9,80
C (argent, cuivre)	=	107,30	— 106,54	=	1,76
D (cuivre, fer)	=	105,54	— 133,50	=	— 27,96

dont la somme est nulle.

1172. La chaleur peut aussi produire des courants dans des circuits non métalliques; d'après Nobili, deux cylindres d'argile de 5 à 8 centimètres de longueur et de 6 à 9 millimètres de diamètre, en communication par une de leurs extrémités avec un multiplicateur, et dont les deux autres sont mises en contact après qu'une d'elles a été chauffée au rouge, produisent un courant qui va de la partie froide à la partie chaude.

1173. Le mercure, comme les autres métaux, jouit de la propriété de produire des courants électriques, lorsqu'il est en con-

tact avec des fils métalliques de même nature à des températures différentes; mais, pour éviter que les mouvements du mercure ne répartissent uniformément la température, il faut placer le mercure dans un tube de verre étroit, terminé par deux fils métalliques, le tenir un peu incliné, et chauffer la partie supérieure; le courant marche de la partie la plus chaude à la partie la plus froide (M. Mazoli). D'après M. Matteucci, deux masses de mercure à des températures différentes, mises en contact, ne produisent point de courants : le mercure ferait, par conséquent, exception au fait général observé par M. Becquerel.

1174. *Piles thermo-électriques.* Si l'on forme un circuit fermé avec un grand nombre de fils ou de tiges de deux métaux soudés alternativement bout à bout, et qu'on chauffe les soudures de rangs pairs ou impairs, les autres étant maintenues à une température constante moins élevée, on obtient des courants qui, pour la même différence de température, ont des intensités qui augmentent avec le nombre des éléments. Les premières piles thermo-électriques ont été construites par MM. Fourier et Œrsted. La fig. 715 représente la disposition qu'ils ont employée : la pile est formée de barreaux de bismuth et d'antimoine; les premiers portent à une de leurs extrémités un appendice que l'on peut plonger dans de la glace, afin de maintenir la soudure correspondante à une température peu différente de 0°; les autres soudures sont chauffées directement par des lampes. Dans une pile à 6 éléments, en chauffant successivement 1, 2, 3, 4.... 6 soudures, ils ont obtenu des déviations de 9°; 13°,75; 18°,5; 22°; 25°,66; et 28°,66.

1175. On peut disposer les piles d'une manière beaucoup plus commode, fondée sur la propriété que possèdent les courants thermo-électriques de ne pas passer à travers l'eau ordinaire : on se sert d'éléments ayant la forme d'un fer à cheval, et on les soude latéralement, de manière que toutes les soudures de rangs pairs soient d'un côté, et toutes les soudures de rangs impairs de l'autre; alors on peut plonger toutes les premières dans un seul vase renfermant de la glace ou un mélange frigorifique, et toutes les autres dans un seul vase renfermant de l'eau ou de l'huile chaude. Cette disposition est très-facile à exécuter avec des fils de fer et de cuivre. J'ai reconnu que, dans une pile fer et cuivre de 100 éléments, l'intensité du courant était proportionnelle aux nombres d'éléments, maintenus à des températures différentes quand le circuit restait toujours le même; mais quand le circuit ne renfermait que les élé-

ments dont on faisait varier la température, l'intensité du courant augmentait dans un plus petit rapport que le nombre des éléments.

1176. Lorsque les piles sont destinées à fonctionner sous l'influence du calorique rayonnant, on les construit avec les métaux dont la puissance thermo-électrique diffère le plus, avec des barreaux de bismuth et d'antimoine. Chaque barreau porte à une de ses extrémités un petit talon par lequel il est soudé à l'élément suivant, de manière que l'ensemble des couples forme un parallélipipède. Les barreaux sont séparés les uns des autres par du papier. C'est ainsi que sont construites les piles des appareils de M. Melloni. Leur effet n'augmente pas à beaucoup près proportionnellement au nombre des éléments, à cause de la longueur du circuit. Nobili a imaginé de disposer les éléments en rayons : l'effet est plus prompt, l'étendue de l'orifice d'accès des rayons de chaleur est beaucoup plus petite, et la pile se refroidit plus rapidement.

1177. *Mesure des températures par les courants thermo-électriques.* Les circuits thermo-électriques peuvent être employés pour mesurer les hautes températures : il suffit, pour cela, de prendre deux fils métalliques d'un petit diamètre, formés de deux métaux peu différents relativement à leurs propriétés thermo-électriques, tels que le platine et le palladium, ou de platine inégalement purifié, tels que ceux qu'on désigne sous le nom de platine mou et de platine dur, tordus par un de leurs bouts et dont les autres communiquent avec les extrémités d'un rhéomètre multiplicateur. On maintient ces deux dernières jonctions à une température constante, tandis que la première est plongée dans la source dont on veut mesurer la température. Par des expériences préliminaires, faites avec le même appareil, on a déterminé les températures correspondantes aux déviations de l'aiguille.

1178. On peut se servir de la même disposition pour déterminer la température de la mer ou celle de la terre, à une grande profondeur; mais il faut alors employer des métaux d'une grande puissance thermo-électrique, tels que le fer et le cuivre; et, pour soustraire le circuit à l'influence des courants qui pourraient résulter de l'action des fils sur les corps environnants, les deux fils doivent être étamés sur toute leur longueur, recouverts de soie et goudronnés. On ne peut pas cependant se servir de ces appareils pour observer la température à une très-grande distance, à cause de la résistance que la grande longueur des fils oppose au mouvement de l'électricité; au-delà de 150 mètres, pour des fils de 1 mil-

limètre de diamètre, une variation de température de quelques degrés est peu appréciable au rhéomètre le plus sensible.

1179. MM. Becquerel et Breschet ont employé la même disposition pour mesurer la température des différents tissus des animaux; ils se sont servis d'aiguilles semblables à celles qu'on emploie dans l'acupuncture, et qui peuvent traverser la plupart des organes sans altérer leurs fonctions. Ces aiguilles étaient formées de deux fils très-minces, l'un d'acier, l'autre de cuivre, parallèles, soudés par une de leurs extrémités, vernis dans toute leur étendue, et séparés dans le reste de leur longueur par une membrane très-mince, ou soudés bout à bout quand l'aiguille devait traverser le corps de part en part. Les jonctions extérieures étaient maintenues à une température constante au moyen d'un appareil de M. Sorel. On ne pouvait pas employer de la glace, attendu que la différence de température aurait été trop grande, et la déviation de l'aiguille trop considérable.

1180. Les piles thermo-électriques peuvent être employées pour reconnaître les variations de température produites dans un conducteur traversé par un courant. Il suffit d'appliquer une des soudures contre le conducteur, les autres étant à la température ordinaire; ou, de chaque côté du fil, deux soudures séparées par une autre intermédiaire. C'est ainsi que Peltier a reconnu l'uniformité de température d'un fil homogène d'un diamètre constant traversé par un courant hydro-électrique, et les variations de température qui se produisent au contact de deux métaux qui font partie d'un circuit fermé, suivant le sens du courant et de la nature des métaux [1110].

1181. *Propriétés physiques et chimiques des courants thermo-électriques.* Ces courants jouissent de toutes les propriétés des courants voltaïques; ils agissent sur l'aiguille aimantée; ils aimantent le fer doux et produisent de la chaleur, des courants d'induction et des actions chimiques. Mais, comme ces courants n'ont qu'une faible tension, pour obtenir des actions chimiques, il faut employer des piles d'un grand nombre d'éléments pour que le courant puisse passer même à travers les liquides les plus conducteurs. M. Botto, de Turin, est parvenu à décomposer de l'eau acidulée, avec une pile de 120 éléments formés de fils de platine et de fer de 27 millimètres de longueur et de 1/4 de millimètre de diamètre, en chauffant avec une lampe à esprit-de-vin les soudures paires ou impaires; la décomposition était plus énergique quand on faisait plonger des fils

de cuivre dans l'eau. M. Becquerel est parvenu à décomposer des sels par un seul élément, platine et cuivre, en fixant aux extrémités libres, des fils de cuivre, de zinc, d'étain, d'argent et de plomb, qu'il plongeait chacun dans une des branches d'un tube recourbé en U et rempli d'une dissolution saline, ayant pour base l'oxyde du même métal que les fils immergés. Cette dernière condition étant indispensable pour que la décomposition eût lieu, il semblerait que les métaux facilement réductibles sont plus disposés à se précipiter sur les lames de même métal que sur d'autres métaux, en vertu de la force d'agrégation. Un élément de platine et fer ne produit point de décomposition : on n'en connaît point la cause.

§ 10. *Courants produits par l'électricité développée dans le frottement.*

1182. L'électricité développée par le frottement peut produire des courants jouissant de toutes les propriétés des courants provenant des autres sources électriques. Nous avons rapporté précédemment une expérience de M. Faraday [956], et une autre de Wollaston [960], qui prouvent que les courants provenant des machines électriques produisent des actions chimiques. M. Arago avait reconnu que, quand un fil de cuivre est tourné en hélice, dont une des extrémités communique avec le sol, et dont l'autre, terminée en pointe, soutire l'électricité d'un conducteur, le courant aimante une aiguille placée dans l'intérieur de l'hélice. Mais M. Colladon est le premier qui soit parvenu à faire dévier une aiguille aimantée par le courant provenant d'une machine ou d'une batterie électrique.

Pour les courants provenant de sources développant de l'électricité à haute tension, le multiplicateur doit être formé d'un fil de cuivre doublement recouvert de soie et verni à la gomme laque, afin d'éviter le passage direct de l'électricité dans les parties voisines des circonvolutions, et il doit faire un grand nombre de tours : celui dont M. Colladon s'est servi avait 500 tours.

En mettant une des extrémités du fil en contact avec l'armature extérieure d'une batterie chargée, et en approchant l'autre, qui était terminée en pointe, d'un conducteur communiquant avec l'autre armature, M. Colladon obtint une déviation qui était sensiblement constante pendant un certain temps, qui croissait lorsqu'on approchait la pointe du conducteur, et qui changeait de sens lorsqu'on alternait les extrémités du fil du multiplicateur. En mettant

une des extrémités du fil en contact avec un des frottoirs d'une machine électrique, et en approchant l'autre du conducteur, on obtient de même des déviations qui croissent à mesure que la distance de la pointe au conducteur devient plus petite, et que la vitesse de rotation de la machine augmente. Enfin, si l'on met les fils en communication avec les conducteurs positif et négatif d'une machine de Nairne, on obtient aussi une déviation permanente pour une vitesse constante. Avec une machine ordinaire, en mettant un seul coussin en contact avec une des extrémités du fil et l'autre avec le conducteur, l'aiguille du multiplicateur est agitée dans tous les sens par une tension électrique positive. Cet effet provient probablement de ce que les coussins ne communiquent entre eux que par des conducteurs imparfaits.

1183. M. Colladon a employé le multiplicateur dont il s'était servi dans ces expériences, pour reconnaître l'électricité de l'atmosphère. Une extrémité du fil fut mise en communication avec la base d'un paratonnerre isolé, l'autre avec une tige qui plongeait dans un puits : dans les temps d'orage l'aiguille était dans un mouvement continuel ; chaque éclair était immédiatement suivi, quelquefois même précédé, d'un changement subit dans le sens de la déviation, ou seulement d'un accroissement de déviation. Depuis, Peltier a repris ces dernières expériences, et a obtenu les résultats suivants. Pendant un temps d'orage, un courant positif a constamment traversé le fil de bas en haut : ainsi l'atmosphère était négative ; l'aiguille a éprouvé de grandes variations comprises entre 0° et 50°, et qui paraissaient coïncider avec le passage des nuages ; quand la pluie survint, elles devinrent moins considérables, et l'aiguille se maintint entre 20° et 30° ; quelques renversements eurent lieu. Comme le multiplicateur communiquait avec l'atmosphère, non par la tige d'un paratonnerre, mais par un fil de cuivre qui s'élevait au-dessus du toit, Peltier pensait que ces dernières déviations provenaient d'une action voltaïque dont les gouttières et les tuyaux formaient l'élément négatif, le fil de cuivre l'élément positif, et qui communiquant entre eux par l'eau qui mouillait la maison et le sol.

M. Colladon a constaté que, dans les temps de pluie, la quantité d'électricité soutirée de l'atmosphère par un arbre est très-sensiblement égale à celle qui est soutirée par une tige métallique de même hauteur et terminée par une pointe aiguë.

1184. *Aimantation par les décharges électriques.* Lorsqu'on

fait passer à travers un fil droit la décharge d'une batterie électrique, de petites aiguilles d'acier, placées perpendiculairement à la direction du fil, sont aimantées; on obtient un plus grand effet quand le fil est tourné en spirale autour d'un tube de verre renfermant les aiguilles. On avait pensé d'abord que l'aimantation par des décharges électriques à travers un fil droit ou tourné en spirale avait lieu dans le même sens que par les courants voltaïques; mais Savary, qui a fait une étude spéciale de l'aimantation par des décharges électriques, a découvert des phénomènes fort remarquables. Quand on fait passer une décharge électrique à travers un fil droit, au-dessous duquel se trouvent placées des aiguilles égales, transversalement et sur un plan incliné, de manière que la distance des aiguilles au fil soit croissante, les aiguilles ne sont pas toujours toutes aimantées dans le même sens; l'existence et le nombre des changements de signe dans l'aimantation, ainsi que la distance à laquelle se trouve l'aiguille qui possède le maximum d'aimantation, quand toutes sont aimantées dans le même sens, dépendent du diamètre du fil, de sa longueur, de l'intensité des décharges et de la trempe des aiguilles. L'aimantation dans les hélices, toujours par les décharges de batteries, varie en intensité et en direction avec l'intensité des décharges, le diamètre et le pas de l'hélice, avec sa longueur, quand elle n'est pas très-grande par rapport à celle de l'aiguille, et enfin avec la nature et l'épaisseur des substances qui enveloppent les aiguilles. L'aimantation par les courants voltaïques de courte durée présente des phénomènes analogues, mais seulement quand la conductibilité de la pile est très-faible. D'après des recherches plus récentes, il paraîtrait que des décharges électriques égales et successives n'agissent pas toujours de la même manière sur une même aiguille, que les effets sont tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. Les lois et les causes de ces phénomènes singuliers sont inconnues. D'après M. Henri Princeton, les changements observés proviennent de ce que la décharge de la bouteille de Leyde produit plusieurs courants successifs dans des sens contraires; mais l'explication laisse trop à désirer pour être admise (*Arch. de l'électr.*, t. x). Il y a d'ailleurs dans l'effet des courants dont il s'agit, deux actions inductives de signes contraires, à l'instant où le courant s'établit et où il cesse, dont les intensités peuvent différer et qui doivent être prises en considération.

1185. *Courants d'induction produits par l'électricité ordinaire.* Si l'on place deux hélices métalliques, l'une à l'intérieur, l'autre à

l'extérieur d'un cylindre de verre, et qu'on fasse passer la décharge d'une bouteille de Leyde à travers une des hélices, l'autre est traversée momentanément par un courant de signe contraire, pourvu qu'elle soit fermée. On produit également des courants induits de différents ordres. Ainsi l'électricité ordinaire se comporte encore, sous ce rapport, comme l'électricité voltaïque. Le courant primitif agit aussi sur lui-même : la décharge d'une bouteille de Leyde à travers un long fil est bien plus énergique que quand on l'effectue à travers un fil court (M. Henri, *A. C. et P.*, t. III). C'est M. Marianini qui a constaté la formation des courants d'induction de différents ordres.

Au moyen de l'inducteur différentiel dont nous avons parlé [1160], M. Dove a fait des expériences nombreuses relativement à l'influence de différentes substances sur l'intensité des courants induits par la décharge d'une batterie. Les différents corps étaient placés sous la forme d'un cylindre ou en fils parallèles de même longueur dans une des hélices inductives. Voici les résultats qu'il a constatés : 1° un cylindre de métal, fer, cuivre, antimoine, bismuth, cuivre, etc., agit toujours pour diminuer l'effet physiologique produit, et d'autant plus que le corps est meilleur conducteur; 2° l'effet physiologique est beaucoup augmenté par un faisceau de fils de fer isolés; 3° un cylindre métallique qui environne le faisceau de fils détruit son action; 4° les mêmes phénomènes se présentent quand le courant induit est employé à l'aimantation des aiguilles d'acier.

Tous les phénomènes produits par la décharge d'une batterie sont très-compliqués, parce que, le courant étant de très-courte durée, les effets contraires produits au commencement et à la fin sont en quelque sorte simultanés; mais il est très-probable que les causes auxquelles M. Dove attribue les influences analogues pour les courants continus se reproduisent ici.

1186. On voit, d'après tout ce que nous venons de dire, que les courants continus ou instantanés provenant de l'électricité ordinaire jouissent de toutes les propriétés des courants voltaïques. Mais ces propriétés ont été mises dans une évidence plus complète par M. Armstrong, au moyen de la puissante machine électrique à vapeur dont nous avons parlé [914]. La décomposition de l'eau a été obtenue d'une manière très-nette par un courant continu; l'aiguille d'un rhéomètre a éprouvé une grande déviation, et un cylindre de fer doux a été fortement aimanté (*A. C. et P.*, t. X).

§ 11. *Électricité développée dans les actions chimiques.*

1187. ***Électricité dégagée par la combustion.*** Si l'on place à quelques centimètres au-dessous d'une plaque de cuivre en contact avec le plateau supérieur d'un électroscope-condensateur, un cylindre de charbon (fig. 715 A) communiquant avec le sol, en allumant le charbon à sa partie supérieure, la colonne d'acide carbonique qui s'élève transmet au plateau de l'électricité positive. Si on place le charbon sur la plaque (fig. 715 B), le plateau se charge d'électricité négative : ainsi, dans la combustion du charbon, l'acide carbonique prend de l'électricité positive et le charbon de l'électricité négative. Le même effet se produit dans la combustion de l'hydrogène : en faisant dégager ce gaz à l'extrémité d'un tube métallique isolé et communiquant avec un des plateaux du condensateur, ce dernier se charge d'électricité négative (M. Pouillet).

1188. ***Électricité dégagée dans la décomposition des corps dont un des éléments est volatil.*** Si l'on fixe au plateau inférieur d'un électroscope-condensateur, et dans le même plan, une lame de cuivre destinée à supporter à son extrémité un petit creuset de platine, en versant dans le creuset incandescent de l'eau distillée, le condensateur ne se charge pas; les acides sulfurique, nitrique et acétique se comportent de la même manière. Avec des dissolutions de chaux, de strontiane ou d'une autre base fixe, le creuset prend l'électricité positive; avec des dissolutions de gaz, d'acides et de la plupart des sels, le creuset prend l'électricité négative. Quand le creuset renferme des sels décomposables dont un des éléments est fixe, les bases prennent l'électricité positive, et les acides l'électricité négative. Lorsqu'on emploie un creuset de fer, et qu'on y verse quelques gouttes d'eau distillée, le creuset se charge d'électricité négative : dans ce cas, l'effet de l'évaporation est nul; mais le métal, en s'oxydant, se charge d'électricité négative.

En général, quand on projette dans un creuset incandescent un liquide volatil capable d'attaquer le métal du creuset, ce dernier se charge toujours d'électricité négative.

Si, après avoir placé sur le plateau d'un électroscope-condensateur une capsule de platine remplie d'acide sulfurique, on y plonge une lame de zinc, le condensateur indique que l'acide se charge d'électricité positive. En employant de l'acide étendu, l'action chimique est beaucoup plus grande, et cependant le condensateur

ne se charge pas : M. de la Rive explique cette différence par la grande conductibilité de l'acide étendu, qui permet aux deux électricités développées de se recombiner immédiatement.

En employant des capsules de différents métaux remplies de différents liquides, et en y plongeant des lames métalliques de différentes natures, M. Becquerel a obtenu les résultats suivants :

Avec une capsule de platine renfermant de l'acide sulfurique concentré ou étendu, ou une dissolution de potasse, des lames d'or, d'argent, de cuivre, de fer, de plomb et de zinc ont toujours donné à la capsule l'électricité positive.

Avec une capsule de cuivre renfermant de l'acide sulfurique concentré, des lames d'or, d'argent, de platine, de fer, de plomb et de zinc ont donné à la capsule les électricités —, —, —, 0, 0, —. En employant de l'acide sulfurique étendu, avec les mêmes métaux, la capsule a pris les états électriques suivants : —, —, —, +, —, +. Enfin, avec une dissolution de potasse, il n'y a eu de différence que pour le plomb, qui n'a pas produit d'électricité appréciable.

Si l'on admet que l'électricité ne se dégage que dans l'action chimique, tous les effets produits en employant des capsules de platine proviennent de l'action des lames métalliques plongées dans les liquides, et, quand on emploie des capsules de cuivre, de la différence des effets produits sur les métaux ; mais, si l'on admet qu'il y ait de l'électricité statique développée dans le contact, sans action chimique, tous les effets obtenus résultent de la différence des actions du liquide sur les deux métaux.

Dans les expériences où un seul corps reste en communication avec l'électroscope, il ne peut y avoir aucune incertitude sur la nature de l'électricité dont les deux corps se sont chargés dans l'action chimique qui a accompagné la séparation. Mais il n'en est pas de même quand on veut déterminer les électricités dont se chargent les corps par leur action réciproque lorsqu'ils font partie d'un circuit électrique : car, de quelque manière que l'on s'y prenne, il y aura toujours au moins trois contacts entre des corps de nature différente, et, par conséquent, incertitude complète sur la participation de chacun à l'effet observé, du moins pour les physiciens qui admettent encore la théorie de Volta ; mais pour ceux qui ont adopté l'opinion, beaucoup plus probable, que les courants voltaïques ne résultent que des actions chimiques, ils n'ont à considérer que les contacts des corps qui sont accompagnés d'action chimique, et l'incertitude cesse, du moins dans beaucoup de cas.

Nous nous contenterons de décrire quelques-unes des expériences de M. Becquerel pour faire comprendre le mode d'expériences qu'il a employé, et nous rapporterons les résultats qu'il a obtenus et les conséquences générales qu'il en a déduites.

1189. Pour observer les actions des dissolutions salines les unes sur les autres, M. Becquerel emploie quatre capsules, A, B, C, D (fig. 716) : la première et la dernière sont en platine; la seconde et la troisième en porcelaine. Supposons que les capsules extrêmes et la deuxième, renferment de l'acide nitrique, la troisième une dissolution alcaline; que la première et la deuxième, ainsi que la troisième et la quatrième, communiquent par des tubes recourbés pleins d'eau, et la deuxième et la troisième par une mèche d'amiante : si on met les capsules A et D en communication avec les extrémités d'un multiplicateur par des fils de platine, il se produit un courant dans le sens DA à travers les liquides. Dans cette expérience, la partie du circuit qui n'est pas symétrique est ainsi composée : *eau, acide, alcali, eau.* M. Becquerel admet que, les actions de l'eau sur l'acide et sur l'alcali étant plus faibles que l'action de l'acide sur l'alcali, on doit considérer cette dernière action comme l'emportant sur les autres, et, par conséquent, le courant comme résultant de l'action chimique de ces deux substances, dans laquelle l'acide prend l'électricité positive.

Si l'on prend deux capsules de porcelaine A et B (fig. 717), remplies l'une d'acide, l'autre d'une dissolution alcaline, et réunies par une mèche d'amiante, en y plongeant les extrémités de platine du fil du multiplicateur, on trouve, comme précédemment, que le courant indique que l'acide prend à la dissolution alcaline l'électricité positive.

M. Becquerel emploie encore une autre méthode : il fixe à une des extrémités du multiplicateur une cuiller en platine, qu'il remplit d'un liquide; à l'autre il place une pince également en platine, dans laquelle se trouve un corps solide, ou de l'amiante imbibé d'un autre liquide; en plongeant l'extrémité de la pince dans la cuiller, il se produit un courant dont le sens et l'intensité dépendent de la nature de l'action chimique produite. Si les deux fils de platine nus, en communication avec un rhéomètre, sont plongés dans de l'acide nitrique, il n'y a point de courant; mais une goutte d'acide chlorhydrique, portée à l'extrémité de l'un d'eux, détermine un courant. Les fils de platine étant remplacés par des fils de fer et de cuivre, en les plongeant dans de l'eau acidulée et ensuite dans une

dissolution concentrée de sulfure de potassium, le courant change de signe, parce que, dans le dernier cas, c'est le cuivre qui est attaqué.

Ces expériences ont conduit M. Becquerel à admettre que les acides étaient positifs par rapport aux bases et à l'eau, que l'eau était positive par rapport aux bases salines, et que, dans les combinaisons et les décompositions des corps, les mêmes éléments absorbaient ou émettaient des électricités contraires.

1190. *Pile à gaz de M. Grove.* Chaque élément se compose de deux tubes de verre fermés par le haut, renfermant chacun un fil de platine de même longueur, et sortant par le sommet où il est soudé : l'un est plein d'hydrogène, l'autre d'oxygène, et ils plongent dans le même verre. Une pile de 50 éléments produit tous les effets des piles ordinaires. Pendant l'action, les gaz diminuent de volume, et il se forme de l'eau. La pile chargée avec de l'acide carbonique et de l'azote, ou avec de l'oxygène et de l'azote, ne produit point d'effet. La cause de l'action paraît résider dans la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène.

1191. *Quantité d'électricité dégagée dans les actions chimiques.* D'après M. Faraday, 53 milligrammes d'eau acidulée exigent pour leur décomposition un courant électrique continu pendant 3′ 45″, suffisant pour maintenir à la chaleur rouge, dans l'air, pendant le même temps, un fil de platine de $0^{mm},30$ de diamètre; et pour opérer cette décomposition, il faudrait employer une pile à plaques de zinc amalgamé, dans laquelle la quantité de zinc dissoute par chaque élément serait égale à 18 centigrammes. Quelle immense quantité d'électricité développée par la dissolution d'une si petite quantité de zinc, quand on considère l'énormité de la vitesse avec laquelle l'électricité parcourt un fil métallique! M. de la Rive estime que la quantité d'électricité développée par la dissolution d'un gramme de zinc dépasse celle qui se dégage dans les plus violents coups de foudre.

1192. *Influence du contact des deux métaux sur l'action chimique exercée par l'un d'eux sur un liquide.* Lorsque deux corps métalliques sont en contact, et plongés dans un liquide, les effets chimiques qu'ils éprouvent sont bien différents de ceux que chaque métal éprouverait s'ils étaient isolés, parce qu'alors les deux métaux et le liquide forment une véritable pile : l'un des métaux est attaqué par les éléments acides résultant de la décomposition du liquide, et sur l'autre viennent se déposer les bases des sels et l'hydrogène. Davy avait imaginé de préserver le doublage en cuivre

des vaisseaux avec de petites quantités de zinc, de fer ou de fonte, mises en contact avec le cuivre : le métal est en effet préservé; mais il se dépose sur le cuivre du carbonate de chaux, des sels de magnésie; les plantes et certains animaux s'y attachent, et cette croûte extérieure ralentit la marche du navire.

1193. *Effet produit dans les actions capillaires.* Une cuiller de platine remplie d'acide nitrique concentré est fixée à l'extrémité du fil d'un multiplicateur; à l'autre extrémité se trouve un fil de platine supportant un morceau d'éponge de platine. En plongeant l'éponge dans l'acide, il se produit un courant qui va de l'éponge au liquide, comme si l'éponge avait pris au liquide l'électricité négative; mais bientôt un courant en sens contraire se développe, continue quelque temps, diminue et disparaît. Avec de l'acide nitrique étendu de la moitié de son poids d'eau, on observe que le premier courant, après avoir duré quelques instants, s'affaiblit et disparaît. En employant de l'acide hydrochlorique concentré, les effets sont inverses de ceux que présente l'acide nitrique concentré. Lorsqu'on retire l'éponge de l'acide nitrique concentré, et qu'après l'avoir chauffée légèrement on la plonge de nouveau dans l'acide, le courant va de l'acide à l'éponge, et persévère dans cette direction jusqu'à ce que l'égalité de température soit établie. Ce dernier effet, qui est bien le résultat de la différence de température, explique le courant secondaire dans la première expérience; mais le courant primitif, et les circonstances particulières que présentent l'acide nitrique étendu et l'acide hydrochlorique sont restés jusqu'ici sans explication (M. Becquerel).

§ 12. *Conductibilité.*

1194. *Vitesse des courants.* En établissant la communication entre les deux pôles d'une pile au moyen d'un fil de cuivre de 227 mètres de long, et plaçant une aiguille aimantée en un point quelconque du fil, on n'a pu observer aucun intervalle de temps appréciable entre l'instant de la fermeture du circuit et l'ébranlement de l'aiguille : ainsi l'électricité se meut avec une grande vitesse dans les corps conducteurs; on ne sait pas si cette vitesse varie avec la nature des corps, et, pour chacun d'eux, avec la nature de la source électrique.

1195. *Égalité d'action dans les points du circuit.* Lorsqu'un courant électrique est établi, le courant a la même intensité dans

tous les points du circuit, qu'il soit formé avec un seul fil métallique d'un même diamètre ou de diamètre variable, ou avec des fils de différents métaux, ou avec des corps solides et liquides de forme et de nature quelconque. Il en est alors de l'électricité comme de l'écoulement d'un fluide par un canal de forme quelconque : par chaque section il passe à chaque instant la même quantité de fluide.

1196. *Égalité d'action dans les points de la section d'un conducteur.* Dans un circuit quelconque, l'électricité ne se porte point à la surface des conducteurs comme l'électricité statique; le courant se propage uniformément à travers les conducteurs. C'est ce qui résulte des expériences que nous allons rapporter. Un fil métallique d'une certaine longueur communiquant avec les extrémités d'une pile agit de la même manière sur une aiguille aimantée qu'un nombre quelconque de fils de même longueur dont la somme des sections est égale à la sienne. Si l'on prend une plaque de cuivre mince, par exemple de $0^m,15$ de longueur et de $0^m,05$ de largeur, dont les extrémités communiquent avec une pile, et qu'on applique sur cette plaque, en deux points dirigés suivant sa longueur, les extrémités du fil d'un rhéomètre multiplicateur très-sensible, on obtient toujours la même déviation, quelle que soit la position des points de contact. Ainsi la plaque peut être considérée comme parcourue par des courants élémentaires parallèles et égaux. C'est sur ce fait que nous avons établi la construction des rhéomètres, dans lesquels les intensités des courants sont proportionnelles aux tangentes des déviations (p. 1100).

1197. *Influence de la longueur et de la section d'un fil conducteur sur l'intensité du courant qu'il transmet.* L'influence de la section et de la longueur d'un fil conducteur ont d'abord été déterminées par H. Davy. Voici la méthode qu'il a employée. Concevons une pile de Wollaston, formée d'un grand nombre d'éléments, plongée dans de l'eau faiblement acidulée, afin qu'elle conserve longtemps son énergie; supposons que deux fils, communiquant avec les pôles, plongent dans un vase plein d'eau acidulée : si en même temps on fait communiquer les pôles par un fil de métal, une partie du courant passera par ce fil, une moindre partie passera à travers l'eau, et la décomposition de ce liquide se fera avec moins d'intensité. On conçoit alors qu'on peut faire varier la longueur et le diamètre du fil conducteur de manière que tout phénomène chimique cesse : la pile est alors déchargée, du moins

sous le rapport des effets chimiques. En supposant les quantités d'électricité produites par la pile proportionnelles aux nombres des éléments, et en comparant les longueurs et les sections des fils de même nature qui déchargent des piles renfermant des nombres différents d'éléments, Davy est parvenu à établir ces deux lois générales : *la conductibilité est en raison inverse de la longueur du fil, et proportionnelle à sa section.* Et, en comparant les nombres de couples que déchargent des fils de même longueur, de même diamètre et de différente nature, le même physicien a obtenu les conductibilités relatives de ces corps.

1198. Plus tard, M. Becquerel est parvenu aux mêmes résultats par un moyen plus exact. Concevons deux fils np, $n'p'$ de même nature, de même longueur et de même diamètre, enroulés dans le même sens sur le cadre d'un multiplicateur; les quatre extrémités des fils plongent dans quatre capsules pleines de mercure, que nous désignerons par n et p, et n' et p'. Supposons maintenant qu'un des pôles d'une pile soit mis en communication par des fils identiques avec les capsules n et p', et que l'autre pôle communique de la même manière avec les capsules p et n' : les courants qui parcourront le multiplicateur seront égaux, de sens contraires, et l'action sur l'aiguille sera nulle. Mais si l'on fait communiquer les capsules n et p, ainsi que les capsules n' et p', par des fils conducteurs non identiques, l'aiguille du multiplicateur ne sera immobile qu'autant que ces deux fils auront la même faculté conductrice. On trouve ainsi qu'un fil de cuivre conduit autant que deux fils de même diamètre d'une longueur double, ou que trois fils de même diamètre d'une longueur triple; d'où résultent les deux lois trouvées par Davy. En prenant des fils de même diamètre, de différente nature, et faisant varier leur longueur jusqu'à ce que l'aiguille reste stationnaire, la conductibilité des substances dont les fils sont formés est évidemment en raison inverse des longueurs de ces fils.

1199. *Conductibilité relative des métaux.* Un grand nombre de physiciens ont cherché par des méthodes différentes la conductibilité relative des métaux; non-seulement ils ont trouvé des nombres fort différents pour chacun d'eux, mais dans les tableaux qu'ils ont formés les métaux ne sont même pas rangés dans le même ordre de conductibilité. La différence des résultats obtenus paraît provenir des méthodes employées et de l'inégale pureté des métaux. Le seul fait général qu'on puisse déduire des expériences faites jusqu'ici, c'est que l'or, l'argent et le cuivre dans un ordre variable,

sont en première ligne, et que le plomb, le fer et le platine sont placés à la fin de la série.

D'après M. Pouillet, la température n'a qu'une faible influence sur la conductibilité de certains corps, tandis qu'elle en a une très-grande sur d'autres : le fer et l'acier sont dans ce dernier cas.

1200. On a reconnu qu'un fil de fer recuit est meilleur conducteur que le fil dur ; que la flamme d'une lampe à alcool conduit l'électricité ; que la chaleur diminue en général la faculté conductrice des métaux. On peut constater ce dernier fait en plaçant entre les deux pôles d'une pile un fil assez fin pour qu'il soit chauffé au rouge par le courant ; si l'on chauffe le fil dans des points où il n'est pas incandescent, l'incandescence diminue, et elle augmente quand on refroidit le fil dans les points environnants. Mais les corps solides mauvais conducteurs, tels que les sels, acquièrent souvent, au contraire, la faculté de conduire l'électricité lorsqu'ils ont été chauffés au point d'être liquéfiés : tels sont la glace, le nitrate de potasse, la potasse, la soude ; les chlorures de plomb, de potassium, de sodium ; le sulfate de potasse, le protoxyde de plomb. Le soufre, le phosphore, l'iodure de soufre, le periodure d'étain, l'orpiment, le réalgar, les acides margarique, oléique, l'acide acétique cristallisé, le camphre artificiel et la résine ne jouissent point de cette propriété. Le verre ne devient conducteur par la chaleur qu'autant qu'il contient une suffisante quantité de potasse ou de plomb. La conductibilité du sulfure d'argent et de l'argent rouge est augmentée par une température peu élevée ; tous deux donnent des étincelles avec le charbon. Les autres sulfures métalliques conduisent plus ou moins à froid ; mais leur faculté conductrice ne paraît pas augmenter par la chaleur. La glace et l'iodure de potassium fondu, qui ne conduisent pas l'électricité à petite tension, sont conducteurs de l'électricité à grande tension provenant des machines (Faraday).

Quand un circuit renferme deux fils de même nature, mais de diamètre différent, le courant a plus d'intensité lorsque l'électricité positive passe du fil le plus fin au fil le plus gros, que dans le cas contraire ; dans un circuit formé de cuivre et de zinc, l'électricité positive passe plus facilement du cuivre au zinc que du zinc au cuivre, et le contraire a lieu pour l'électricité négative. Il y a une certaine analogie entre les séries des métaux rangés suivant l'ordre de leur conductibilité pour la chaleur et pour l'électricité.

1201. *Lois de M. Ohm.* Dans tout ce que nous venons de dire, il n'a été question que des conductibilités relatives des fils, mais

non de l'intensité du courant dans un circuit renfermant une pile dont on fait varier le nombre des éléments, ainsi que les dimensions du fil qui en réunit les pôles. Les lois de ces intensités ont été découvertes par M. Ohm en 1826 et en 1827. Les recherches de cet habile physicien sont tellement importantes et si peu connues en France, que nous croyons devoir les analyser avec quelques détails.

1202. Les premières expériences ont eu pour objet de déterminer l'influence de la longueur des conducteurs. M. Ohm s'est servi d'une pile thermo-électrique; les barreaux des éléments étaient maintenus à des températures constantes de 0° et de 100° par de la glace et de la vapeur d'eau, sans contact immédiat avec l'eau : les conducteurs provenaient d'un même fil; ils étaient amalgamés à leurs extrémités sur une même longueur, et vernis au delà; l'intensité du courant se mesurait par la torsion, au moyen d'une aiguille aimantée suspendue par une lame d'or, longue, mince et étroite. En établissant les communications successivement avec huit fils dont les longueurs étaient de 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66 et 130 pouces, il a obtenu les résultats suivants.

DATE des observations.	ORDRE des expériences.	CONDUCTEURS.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
8 janvier.	1	326 $\frac{3}{4}$	300 $\frac{3}{4}$	277 $\frac{3}{4}$	238 $\frac{1}{4}$	190 $\frac{3}{4}$	134 $\frac{1}{2}$	83 $\frac{1}{2}$	48 $\frac{1}{2}$
11 janvier.	2	311 $\frac{1}{4}$	287	267	230 $\frac{1}{4}$	183 $\frac{1}{2}$	129 $\frac{3}{4}$	80	46
	3	307	284	263 $\frac{3}{4}$	226 $\frac{1}{4}$	181	128 $\frac{3}{4}$	79	44 $\frac{1}{2}$
15 janvier.	4	305 $\frac{1}{4}$	281 $\frac{1}{2}$	259	224	178 $\frac{1}{2}$	124 $\frac{3}{4}$	79	44 $\frac{1}{2}$
	5	305	282	258 $\frac{1}{4}$	223 $\frac{1}{2}$	178	124 $\frac{3}{4}$	78	44

1203. M. Ohm a ensuite reconnu que tous ces résultats s'accordent très-bien avec la supposition que les intensités des courants varient en raison inverse des longueurs des fils augmentés d'une quantité constante qui représentait la résistance de la pile; de sorte qu'en représentant par I l'intensité d'un courant, par R la résistance de la pile, par L la longueur du fil, et par A un coefficient constant, on a

$$I = \frac{A}{L + R}.$$

Le tableau suivant donne les intensités calculées d'après cette formule.

ORDRE des expériences.	CONDUCTEURS.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	328	300 $\frac{4}{5}$	277 $\frac{1}{3}$	240 $\frac{3}{4}$	190 $\frac{1}{2}$	134 $\frac{1}{2}$	84 $\frac{1}{2}$	48 $\frac{1}{2}$
2	313	287 $\frac{1}{4}$	265 $\frac{1}{3}$	230 $\frac{1}{4}$	182	128 $\frac{1}{5}$	80 $\frac{1}{4}$	46 $\frac{1}{5}$
3	309 $\frac{1}{2}$	284	262 $\frac{1}{5}$	228	180	127	79 $\frac{1}{4}$	45 $\frac{3}{4}$
4	305 $\frac{1}{2}$	280 $\frac{1}{2}$	259	224 $\frac{3}{4}$	177 $\frac{3}{4}$	125 $\frac{1}{4}$	79	45
5	305 $\frac{1}{2}$	280 $\frac{1}{2}$	259	224 $\frac{3}{4}$	177 $\frac{3}{4}$	125 $\frac{1}{2}$	79	45

La coïncidence presque complète entre les résultats de l'observation et du calcul ne laisse aucun doute sur l'exactitude de la loi supposée. Dans ce même mémoire, M. Ohm dit avoir appliqué sa formule à des expériences faites par M. Bischoff avec une pile hydro-électrique, pour constater la proportionnalité entre l'action chimique et l'action électro-magnétique, et qu'il a obtenu des résultats satisfaisants (*Journal de Schweigger*, t. XVI, p. 137, 1826).

1204. Dans un autre mémoire, M. Ohm décrit des expériences faites avec la même pile thermo-électrique, en réunissant successivement ses pôles par 1, 2, 3.... et 8 fils identiques, et ensuite par 3 fils A, B, C, ayant des longueurs 1, 2, 4, employés simultanément, deux à deux, ou séparément. Les deux tableaux suivants présentent les résultats de l'observation et du calcul. Pour le premier tableau, M. Ohm a employé ce principe qui était déjà connu, et qu'il avait vérifié lui-même par l'expérience, que les fils de même nature ont la même conductibilité quand leurs longueurs sont dans le même rapport que leurs sections. Pour le dernier, M. Ohm suppose que les courants se partagent dans les fils proportionnellement à leur conductibilité; d'après cela, en désignant par D la longueur d'un fil de même nature qui produirait le même effet que les fils *a*, *b*, *c*, on a

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}.$$

NOMBRE des conducteurs.	OBSERVATIONS. I.	II.	Moyenne.	Calcul.
1	39 $\frac{1}{4}$	39 $\frac{1}{2}$	39,7	39,2
2	70 $\frac{1}{2}$	69 $\frac{1}{2}$	70,0	70,8
3	97 $\frac{1}{2}$	98 $\frac{1}{4}$	97,9	97,0
4	120	120	120,0	118,8
5	137 $\frac{1}{2}$	139 $\frac{1}{2}$	138,5	137,5
6	154	152 $\frac{3}{4}$	153,4	153,5
7	168	165 $\frac{1}{4}$	166,9	166,5
8	178	178 $\frac{1}{2}$	178,5	179,7

CONDUCTEURS qui forment le circuit.	OBSERVATIONS. I.	II.	Moyenne.	Calcul.
A B C	325 $\frac{3}{4}$	320 $\frac{1}{4}$	323,0	322,4
A B	311 $\frac{1}{2}$	306 $\frac{1}{4}$	308,9	307,1
A C	289 $\frac{1}{2}$	282 $\frac{1}{4}$	286,0	289,3
B C	237	232 $\frac{1}{4}$	234,7	233,7
A	265 $\frac{1}{4}$	261 $\frac{1}{4}$	263,3	265,6
B	191 $\frac{1}{2}$	185 $\frac{1}{4}$	188,6	188,4
C	122	120	121,0	119,1

Ces tableaux constatent l'exactitude des lois supposées (*Journal de Schweigger*, t. XIX, p. 1. Janvier 1827).

1205. Dans le mois de juin de la même année, M. Ohm a publié un ouvrage sur la théorie mathématique de la pile galvanique. Le principe admis par M. Ohm est celui-ci : l'électricité développée aux pôles d'une pile par la puissance électro-motrice se propage dans le circuit d'une molécule à la suivante, par un excès infiniment petit de tension, comme la chaleur se propage dans une barre en vertu de l'excès de température d'une tranche sur la suivante. Dans la première partie très-élémentaire de son livre, M. Ohm démontre toutes les formules qu'il avait obtenues par l'expérience; dans la seconde, il traite la question d'une manière générale par des méthodes analogues à celles que Fourier a employées pour la transmission de la chaleur. Nous donnerons un résumé succinct de la première partie de cet ouvrage.

Considérons d'abord un seul élément MM' (fig. 1015) dont les faces polaires soient réunies par un fil homogène MNPQ que la figure représente développé, et représentons par la ligne M*a* l'excès de tension electrique d'une des faces sur l'autre; l'électricité se propageant d'une tranche du fil à la suivante en vertu d'un excès de tension, l'état du fil ne sera permanent que quand la variation de tension sera constante dans toute la longueur du fil; alors, si l'on joint le point *a* avec le point Q, les ordonnées de la droite représenteront les tensions des différents points du fil; si l'on néglige la résistance de l'élément électro-moteur, comme la somme totale des variations de tensions des points du fil est égal à

Ma, la variation de tension de chaque point sera en raison inverse de la longueur du fil; la quantité d'électricité qui s'écoulera à chaque instant par chaque tranche, ou l'intensité du courant, sera proportionnelle à l'intensité de l'élément électro-moteur, à la conductibilité de la tranche du fil et en raison inverse de sa longueur. Si le circuit était formé de plusieurs fils différents, quand le régime permanent sera établi, la même quantité d'électricité devra encore passer à chaque instant par une tranche quelconque des fils et par chaque fil; par conséquent, dans chacun d'eux la variation de tension sera en raison inverse de sa conductibilité; la somme totale des variations de tension dans le circuit sera toujours égale à la tension polaire (fig. 1013 A); et chaque fil pourrait être remplacé par un autre de même conductibilité [1197]. Si maintenant on veut avoir égard à la résistance de l'élément au mouvement de l'électricité, qui doit nécessairement revenir à la surface de départ, il suffit de remarquer que cette résistance est toujours équivalente à celle d'une certaine longueur de fil, et, par conséquent, qu'il suffira de considérer le circuit comme étant augmenté d'une certaine quantité. Si dans le circuit il y a plusieurs éléments électro-moteurs, M. Ohm admet que les courants de chacun d'eux subsistent sans se troubler; alors il est facile de reconnaître que la variation de tension de chaque section du fil sur la suivante sera égale à la somme des variations correspondantes à chaque élément. Ainsi, en supposant un second élément NN' (fig. 1013) dont la tension est Nb, la ligne des tensions sera $bcde$, parce qu'elle doit se terminer à NN'; et pour un point quelconque P, les variations de tensions correspondantes aux deux courants seront mm' et nn', et tout se passera comme s'il n'y avait qu'un seul élément ayant une tension $Ma + Nb$: car au point P la tension sera $Pm + Pn$, dont l'excès sur la tension du point suivant sera $mm' + nn'$.

Chaque fil pouvant être remplacé par un autre d'une section et d'une nature déterminée, mais ayant une longueur différente, par exemple par un fil de cuivre ayant $0^{m},00001$ de section [1197], M. Ohm appelle longueur réduite d'un fil la substitution dont nous venons de parler; par cette convention, toutes les lois relatives à la conductibilité deviennent très-simples.

Pour un seul élément, en désignant par A l'intensité du courant correspondant à une résistance égale à l'unité, par L la longueur réduite du fil, par R la résistance de l'élément estimé avec la même unité, et par I l'intensité du courant, on a

$$I = \frac{A}{L+R}.$$

Si la pile est formée de m éléments égaux, on a

$$I = \frac{mA}{L+mR}.$$

Dans le cas où les éléments seraient inégaux, la formule deviendrait évidemment

$$I = \frac{\Sigma A}{L+\Sigma R},$$

ΣA et ΣR représentant la somme des puissances électro-motrices des éléments et la somme de leurs résistances.

Si les éléments en nombre n sont égaux et réunis par les pôles de mêmes noms, ils ne formeront qu'un seul élément dont la résistance sera n fois plus petite, et l'on aura

$$I = \frac{A}{L+\frac{R}{n}} = \frac{nA}{nL+R}.$$

On voit, d'après cette dernière formule, que, quand on augmente la surface d'un élément, l'intensité du courant n'éprouve que de bien faibles variations, à moins que L ne soit très-petit.

Quand la pile renferme m éléments semblables à celui dont nous venons de parler, l'intensité du courant devient

$$I = \frac{mnA}{nL+mR} = \frac{A}{\frac{L}{m}+\frac{R}{n}}.$$

Ainsi, quand on augmente la surface de l'élément, c'est comme si on diminuait dans le même rapport sa résistance; et quand on augmente le nombre des éléments, cette augmentation diminue dans le même rapport la résistance de la partie extérieure du circuit.

Quand les pôles de la pile ou deux points quelconques du circuit sont réunis en même temps par plusieurs fils dont les longueurs réduites sont λ, λ', λ'', etc., en désignant par Δ la longueur réduite d'un fil, dont la résistance serait égale à celle des fils de dérivation, et par δ la différence de tension statique aux extrémités des fils, on a

$$\frac{\delta}{\Delta} = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta}{\lambda'} + \frac{\delta}{\lambda''} + \ldots; \quad \text{d'où } \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda'} + \frac{1}{\lambda''} + \ldots;$$

et en désignant par L la résistance totale du circuit avant la dérivation, l'intensité du courant général après la dérivation sera évidemment

$$I = \frac{A}{L + \Delta},$$

et les intensités i, i', i''.... des courants partiels seront donnés par les équations

$$i = I.\frac{\Delta}{\lambda}; \quad i' = I\frac{\Delta}{\lambda'}; \quad i'' = I\frac{\Delta}{\lambda''}....$$

Voilà à quoi se réduisent toutes les formules relatives à la conductibilité.

1206. Les formules de M. Ohm n'avaient été bien constatées par lui que sur des courants thermo-électriques. Depuis l'apparition de son livre, plusieurs physiciens étrangers ont cherché à reconnaître si elles s'appliquaient exactement aux courants hydro-électriques. De tous ces travaux, le plus important est sans contredit celui de M. Fechner, publié en 1831. Cet habile physicien a constaté les faits suivants : 1° l'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit; 2° la résistance est indépendante de la forme de la section; 3° les intensités des courants directs et celles des courants dérivés suivent les lois reconnues par M. Ohm; 4° les lames métalliques, intercalées dans un arc liquide, diminuent l'intensité du courant, suivant les lois observées par M. de la Rive; 5° la conductibilité du liquide a lieu suivant les mêmes lois que pour les corps solides; mais le courant éprouve une résistance pour passer d'un de ces corps dans l'autre. M. Fechner s'est encore occupé des circonstances qui influent sur la puissance électro-motrice d'un élément, en raison de l'étendue relative des surfaces; et de la conductibilité relative de différents liquides, en évitant l'erreur résultant de la résistance que le courant éprouve en pénétrant et en sortant du liquide.

A l'époque où M. Fechner a fait ces expériences, elles présentaient quelques difficultés, car on ne connaissait pas alors les piles à courant constant. Mais les variations que présente une pile ordinaire, très-rapides dans les instants qui suivent la fermeture du circuit, s'éteignent peu à peu, et, après un certain temps qui dépend de la nature de la pile et de celle du liquide, le courant affaibli devient sensiblement constant, pourvu que le circuit reste toujours fermé, comme M. Ohm et M. Matteucci l'ont observé depuis longtemps. Il fallait alors, pour vérifier les lois dont

il est question, des appareils plus sensibles que ceux qui eussent été nécessaires si l'on se fût servi des piles à effet constant; et il fallait, en outre, employer la méthode des observations alternatives, imaginée par Coulomb, et employée plus récemment par MM. Biot et Savart dans les expériences que nous avons rapportées [1084]; méthode qui permet de déterminer avec beaucoup d'exactitude les lois des actions d'un courant malgré ses variations. C'est ainsi que M. Fechner a opéré : les piles étaient ordinairement chargées d'une dissolution de sel marin, et les intensités étaient mesurées par la torsion ou par la méthode des oscillations.

Les mémoires et les ouvrages de M. Ohm et de M. Fechner n'ont point été traduits en français; ils ont seulement été indiqués par des extraits forts courts, insérés dans le *Journal de Ferussac*, t. IX et XV (années 1828 et 1831).

M. Pouillet s'est occupé de son côté de la conductibilité. Dans la première édition de son *Traité de Physique*, publié en 1828, il a annoncé que, dans les circuits hydro-électriques, les intensités des courants étaient proportionnelles à la conductibilité du fil, augmenté d'une quantité constante qui représentait la résistance de la pile. En 1831, le même physicien a présenté à l'Académie des sciences un mémoire sur les lois des courants dérivés, provenant d'une pile thermo-électrique : un extrait de ce mémoire a été publié dans le journal le *Lycée*. Enfin, en 1838, M. Pouillet a communiqué à l'Académie un nouveau mémoire sur la conductibilité, résultant d'expériences faites avec des piles à courants constants et à éléments variables : un extrait succinct de son mémoire a été inséré dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie;* le travail complet de M. Pouillet n'a été imprimé que dans la troisième édition de son *Traité de Physique*, ouvrage dont la publication est postérieure à la dernière édition de ce livre. Les lois et les formules de M. Pouillet ne diffèrent pas de celles de M. Ohm.

1207. *Détermination des différents éléments qui influent sur l'intensité des courants.* Pour employer les formules relatives à la conductibilité, il faut, dans chaque cas particulier, déterminer des quantités constantes qui dépendent de la nature de la pile et du liquide excitateur. Il résulte des lois de M. Ohm, que l'intensité d'un courant est proportionnelle à la force électro-motrice et en raison inverse de la résistance; par conséquent, si dans un circuit quelconque on introduit un rhéomètre, et si l'on augmente successivement la longueur du circuit par des fils additionnels, en mesurant

chaque fois l'intensité du courant on obtiendra autant d'équations qui serviront à déterminer les constantes, l'intensité de la pile et la résistance des différentes parties du circuit. C'est la méthode qui a été suivie généralement. On y a reconnu des inconvénients résultant de l'imperfection des rhéomètres, et récemment MM. Poggendorf, Jacobi, et Wheatstone ont cherché à s'y soustraire, en faisant varier la longueur des fils additionnels de manière à obtenir une déviation constante : alors la graduation de l'instrument n'entre plus dans la détermination des constantes, et leur évaluation offre plus d'exactitude. Nous donnerons un résumé du mémoire de M. Wheatstone (*A. C. et P.*, t. x).

Le premier instrument décrit par M. Wheatstone, est représenté fig. 1014 : *g* est un cylindre de bois, *h* un cylindre de laiton, tous deux ayant le même diamètre et leurs axes parallèles. Sur le cylindre de bois est entaillée une rainure en hélice, et à une de ses extrémités est fixé un anneau de cuivre, auquel est attaché l'un des bouts d'un long fil métallique d'un très-petit diamètre. Lorsque ce fil est enroulé autour du cylindre de bois, il remplit toute la rainure, et il est fixé, par son autre bout, à l'extrémité opposée du cylindre de cuivre. Deux ressorts *j* et *k* pressant, l'un contre l'anneau de cuivre du cylindre de bois, l'autre contre l'extrémité du cylindre de cuivre *h*, au moyen de deux vis de jonction, peuvent être mis en communication avec les fils métalliques du circuit. La manivelle mobile *m* sert à faire tourner les cylindres sur leurs axes. Lorsqu'elle est placée sur le cylindre *h* et tournée de gauche à droite, le fil métallique se déroule de dessus le cylindre de bois et s'enroule sur le cylindre de cuivre ; mais lorsqu'on l'adapte au cylindre *g*, et qu'on la tourne de droite à gauche, le contraire a lieu. Les circonvolutions sur le cylindre de bois étant isolées, et tenues séparées l'une de l'autre par la rainure, le courant suit la longueur entière du fil enroulé sur ce cylindre ; mais les circonvolutions sur le cylindre de cuivre n'étant pas isolées, le courant passe immédiatement du point du fil en contact avec ce cylindre, au ressort *k*. La partie efficace de la longueur du fil se réduit donc à la portion variable enroulée sur le cylindre de bois. Une échelle divisée placée entre les deux cylindres indique le nombre des circonvolutions déroulées, et une aiguille fixée à l'axe d'un des cylindres indique sur un cadran divisé les fractions de circonvolutions. M. Bréguet a appliqué aux appareils de M. Wheatstone des compteurs qui remplacent avec avantage la règle divisée dont nous venons de parler.

Les cylindres ont 6 pouces anglais de long, 1 pouce 1/2 de diamètre; le filet de la vis est de 1/40 de pouce, le fil est en laiton de de 1/100 pouce de diamètre. La figure montre l'appareil disposé pour une expérience : B est un rhéomètre très-sensible portant un microscope; C est l'électro-moteur.

La fig. 1015 représente un rhéostat qui convient pour les courants d'une plus faible intensité : *a* est un cylindre de bois, sur lequel se trouve une rainure en hélice; un gros fil de cuivre est enroulé dans la rainure. Au-dessus du cylindre, et parallèlement à son axe, se trouve une barre métallique triangulaire *b*, portant un curseur *c*; à ce curseur est adapté un ressort *d*, qui presse constamment contre les spires du fil de cuivre, en cédant à toutes les petites inégalités. L'un des bouts de l'hélice métallique est attaché à un anneau en laiton *e*, contre lequel presse un ressort *f*, qui est en communication, au moyen d'une vis de jonction, avec l'une des extrémités du circuit; l'autre extrémité est retenue par une vis semblable, en contact métallique avec la barre triangulaire de métal. En tournant la manivelle *h*, on entraîne le cylindre, et le curseur *c*, guidé par le fil de cuivre, glisse le long de la barre, avançant ou reculant suivant que le cylindre tourne à droite ou à gauche; le curseur venant à se mettre en contact avec un point différent du fil de cuivre, une résistance différente est introduite dans le circuit, occasionnée par la seule portion du fil comprise entre le curseur et le bout qui est en communication avec le ressort *f*. Le cylindre a 10 1/2 pouces anglais de longueur, 3 1/4 pouces de diamètre; le fil de cuivre a 1/10 de pouce de diamètre, et fait 108 circonvolutions autour du cylindre. Les dimensions de l'instrument, la longueur et le diamètre du fil dépendent des limites de la résistance variable qu'on veut introduire dans le circuit. La fig. 1015 représente la disposition d'un circuit thermo-électrique dans lequel le rhéostat est interposé.

M. Wheatstone pense que sous cette dernière forme son instrument peut être utilement employé comme régulateur de courant, et principalement dans les opérations de l'électrotypie.

L'unité de résistance choisie par M. Wheatstone est celle d'un fil de cuivre d'un pied de longueur qui pèse 100 grains (poids anglais). Le diamètre de ce fil est de 0,071 d'un pouce anglais.

Lorsque la résistance totale du fil du rhéostat est insuffisante, on emploie des bobines autour desquelles sont enroulés des fils de cuivre recouverts de soie, dont la longueur ou le diamètre sont

connus, ou dont la résistance a été déterminée par des expériences spéciales. Les deux bouts de chaque fil sont attachés à des fils courts et d'un fort diamètre fixés aux surfaces supérieures des cylindres, et servent à réunir tous les fils en un seul. Les deux fils métalliques *a* et *b* forment les extrémités de ces fusées qui les réunissent au circuit. Sur la face supérieure de chaque cylindre est un ressort double de laiton, mobile autour du centre, de sorte que ses extrémités puissent poser à volonté sur les bouts des gros fils qui servent à réunir toutes les bobines, ou en être écartées et ne poser que sur le bois. Dans la dernière position, le courant du circuit est obligé de suivre les circonvolutions de la bobine; mais dans la première position le courant suit le ressort et soustrait du circuit la résistance entière de la bobine. Quand les ressorts posent sur les gros fils métalliques, la résistance de toute la série des cylindres est supprimée; et, en tournant convenablement les ressorts, on peut introduire un nombre quelconque de bobines dans le circuit.

Voici maintenant les divers usages de l'appareil.

Pour déterminer la résistance d'un corps quelconque, on le place dans un circuit renfermant une pile ou un élément à effet constant, et un rhéostat; ensuite on le supprime, et au moyen du rhéostat, on augmente la longueur du circuit, jusqu'à ce que l'aiguille du rhéomètre revienne au même point : il est évident que la longueur du fil ajouté est la mesure de la résistance cherchée.

On peut déterminer ainsi la résistance des fils du rhéomètre; mais il faut avoir un rhéomètre auxiliaire. A défaut de deux rhéomètres on peut employer deux éléments égaux, en désignant par λ la longueur du fil qu'il faut ajouter au circuit pour obtenir avec deux éléments la même déviation que quand il n'y en a qu'un seul, par E la force électro-motrice d'un seul élément, par r la longueur réduite du circuit, et par g celle du rhéomètre, on a évidemment

$$\frac{E}{R+r+g} = \frac{2E}{2R+r+g+\lambda}; \quad \text{d'où } g = \lambda - r.$$

La résistance de l'électro-moteur peut se déterminer par les procédés suivants. Si deux électro-moteurs, pour produire des déviations égales, exigent des résistances totales dans le rapport de R à nR, ce rapport est exactement celui de leurs intensités : car on a $E : R = nE : nR$. Mais, comme il est difficile de mesurer les résistances totales, M. Wheatstone emploie le moyen suivant. Les deux courants produisant la même déviation, on augmente la ré-

sistance du premier circuit d'une longueur de fil r, de sorte que la résistance totale devienne $R+r$, et on cherche la longueur nr de fil qui fait produire au second la même déviation que le premier; n est alors le rapport des deux électro-moteurs : car si, dans l'expression $E : R+r$ qui représente l'intensité du courant dans le premier cas, on multiplie r par n, pour que sa valeur ne change pas, il faut multiplier E et R par le même facteur, et l'expression du courant devient $nE : nR+nr$. M. Wheatstone a constaté, ainsi qu'on l'avait déjà observé, que la force électro-motrice d'un élément est indépendante de ses dimensions; que la force d'une pile est proportionnelle au nombre de ses éléments, etc.

La résistance de l'électro-moteur peut s'obtenir par la méthode suivante : l'aiguille du rhéomètre étant en un point a du cadran, on ajoute au moyen de l'appareil une longueur de fil r, de manière que l'aiguille rétrograde jusqu'en un point b; alors en désignant par F la force de la pile, par R sa résistance, et par g la longueur totale du fil lors de la première observation, l'intensité F du courant dans le dernier cas sera $E : (R+g+r)$. Supprimons maintenant le fil additionnel r, et plaçons un fil de dérivation partant des pôles de la pile et qui partage le courant avec le rhéomètre; et réglons la longueur r' de ce fil de manière que l'aiguille du rhéomètre arrive au point b; en désignant par Δ la longueur du fil réduit qui produirait l'effet des deux fils réunis, on aura

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1}{g} + \frac{1}{r'}; \quad \text{d'où } \Delta = \frac{gr'}{g+r'},$$

et le courant qui traversera le rhéomètre aura pour intensité

$$\frac{E}{R+\Delta} \cdot \frac{\Delta}{g} = \frac{Er'}{R(g+r')+gr'};$$

et comme les déviations du rhéomètre sont égales, on aura

$$\frac{E}{R+g+r} = \frac{Er'}{R(g+r')+gr'}; \quad \text{d'où } R = \frac{rr'}{g}.$$

1208. *Conductibilité des liquides.* Dans un circuit formé en partie par un canal plein de liquide, l'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit. L'intensité du courant est aussi la même dans tous les points d'une même section : c'est ce qu'on peut facilement reconnaître en plongeant dans le liquide et

à différentes profondeurs deux fils de cuivre communiquant avec les extrémités d'un rhéomètre multiplicateur, maintenus à une distance fixe et recouverts de vernis sur toute leur étendue excepté aux extrémités (Nobili). On peut encore constater ce fait par un autre mode d'expérience également dû à Nobili. Si l'on divise un canal en un nombre quelconque de compartiments égaux ou inégaux, et si l'on verse dans chacun, à la même hauteur, une dissolution d'acétate de plomb, les lames métalliques sont toutes colorées du même côté par les éléments électro-positifs qui s'y déposent en y formant une teinte uniforme, et les faces opposées se recouvrent d'une couche de plomb d'une épaisseur aussi uniforme. L'égalité de distribution des courants dans la section du canal subsiste encore quand elle devient plus grande ou plus petite. Quand le canal est en partie seulement intercepté par une plaque métallique, la plus grande partie du courant se détourne pour éviter l'obstacle. Lorsque l'intensité du courant sur l'unité de section augmente par le rétrécissement du canal, l'action chimique ne croît pas proportionnellement à l'accroissement d'intensité du courant. Si un courant parcourt un large canal plein d'un liquide conducteur, dans lequel il pénètre et d'où il sort par des plaques de platine, et qu'on observe les intensités des courants élémentaires à l'aide de deux pointes maintenues à une distance constante, fixées aux extrémités d'un rhéomètre, et qu'on place à différents points du canal et à différentes profondeurs, on trouve que l'intensité est à son minimum au milieu du canal, qu'elle est plus grande dans le voisinage du pôle positif, et un peu plus faible près du pôle négatif; qu'il existe des courants intenses derrière la plaque positive, et qu'il n'en existe point derrière la plaque négative. Ainsi tout se passe comme si les courants élémentaires traversaient le liquide en rayonnant tout autour du pôle positif et en convergeant vers le pôle négatif (M. Matteucci).

1209. D'après tout ce que nous venons de dire, il semblerait que les lois relatives à la conductibilité des liquides sont les mêmes que pour les corps solides; mais quand un liquide est interposé dans un circuit, le liquide agit pour diminuer l'intensité du courant, non-seulement par la conductibilité, mais encore par deux circonstances qui n'ont été prises en considération que récemment. Le courant éprouve une résistance en passant des conducteurs métalliques au liquide, et du liquide aux conducteurs; et en outre, les matières qui se déposent sur les plaques par suite

de l'action chimique, produisent des courants opposés à celui qui règne dans le circuit, et qui en diminuent l'intensité.

1210. M. Wheatstone, dans le mémoire que nous avons déjà cité, indique une méthode pour déterminer les conductibilités relatives des liquides. Elle consiste à placer dans un circuit un rhéostat et un cylindre de verre fermé par deux plaques de platine de la dimension du cylindre, l'une fixe, et l'autre mobile; le cylindre étant rempli de liquide, on observe la position de l'aiguille du rhéomètre, on fait mouvoir la plaque mobile d'une certaine quantité, et l'on observe la nouvelle position de l'aiguille; on fait ensuite revenir la plaque à sa position primitive, et on augmente ou on diminue la longueur du fil fournie par le rhéostat, de manière à obtenir la même déviation. Il est évident que les actions des plaques étant les mêmes dans ces expériences, la résistance du fil ajouté ou supprimé est égale à celle du cylindre liquide ajouté ou supprimé. Il faut cependant que ces expériences aient lieu dans un temps très-court, afin que le liquide et les plaques n'éprouvent pas de notables changements pendant leur durée.

Ainsi, toutes les expériences qui ont été faites en observant les longueurs des fils qui produisent la même résistance que des colonnes liquides, ne donnent point une mesure de leur conductibilité.

1211. Nous rapporterons cependant quelques résultats obtenus par M. Matteucci, en intercalant dans un circuit des dissolutions renfermant 0,01 de différents corps, et dans lesquels le courant entrait et sortait par des fils de platine.

	Déviation.		Déviation.
Eau distillée	2°	Bi-oxalate de potasse	14°
Alun	4,3	Sulfate de cuivre	20
Chlorure de calcium	5	Nitrate de mercure	35
Chlorure de potassium	5	Nitrate d'argent	45
Sulfate de magnésie	6	Acide oxalique	14
Sulfate neutre de fer	6	— tartrique	10
Chlorure de sodium	7	— chlorhydrique	10
Nitrate de potasse	7	— sulfurique	8
Hydrochlorate d'ammoniaque	8	— nitrique	8
Chlorure de baryum	9	Potasse	15
Acétate neutre de plomb	9	Ammoniaque	8

Avec l'acétate de plomb et les nitrates d'argent et de mercure seulement on a observé des traces de décomposition. Le sucre et

l'iodure de soufre étant dissous en quantité quelconque dans l'eau n'augmentent pas sa faculté conductrice.

Il résulte de ce tableau que la conductibilité des acides est inférieure à celle des sels renfermant les mêmes acides, mais il faut remarquer que dans ce mode d'expérience, la déviation observée résulte à la fois de la conductibilité, de la résistance au passage des liquides aux fils et des fils aux liquides, et de l'action chimique.

1212. En augmentant la quantité de sel dissous, M. Matteucci a reconnu : 1° qu'avec le chlorure de potassium, le maximum a lieu à 4/100, et que la conductibilité reste constante jusqu'à la saturation ; 2° qu'avec le chlorure de sodium, le maximum de conductibilité a lieu à 1/100 ; qu'elle reste constante jusqu'à 4/100, et diminue de 1/5 jusqu'à la saturation ; 3° qu'avec l'acétate de plomb le maximum a lieu à 4/100, et diminue jusqu'à la saturation, où elle est la même qu'à 1/200 ; 4° qu'avec le nitrate d'argent le maximum a lieu à 2/100 jusqu'à 4/100 ; 5° que l'acide sulfurique se comporte de la même manière.

Lorsqu'une dissolution a atteint son maximum, l'addition d'un autre sel augmente la conductibilité, comme si le premier sel n'existait pas, à moins qu'il n'y ait précipitation d'un sel insoluble. Le chlorure d'iode, le protochlorure d'étain, et le chlorure de cuivre, ajoutés en quantités convenables à une dissolution de chlorure de sodium, ont offert une conductibilité presque métallique.

Le même physicien a aussi reconnu que la chaleur augmente la conductibilité des dissolutions salines, mais d'autant moins que la conductibilité est plus grande ; pour l'eau distillée, la température en s'élevant de 8° à 80°, la déviation a varié de 4° à 27° ; pour l'eau de puits une variation de 5° à 80° a fait augmenter la déviation de 4° à 41° ; pour l'eau saturée de sel marin une variation de température de 7° à 85° a porté la déviation de 7° à 35° ; et enfin, pour le nitrate d'argent une variation de 22° à 45° a produit un accroissement de déviation de 73° à 89°.

1213. Un milieu composé de deux liquides séparés par une membrane animale possède une conductibilité très-différente, suivant le sens du courant ; pour l'eau, et l'eau contenant quelques gouttes de chlorure d'iode, le courant entrant par ce dernier liquide produit une déviation six fois plus forte que quand il entre par l'eau pure (M. Matteucci).

1214. Un courant d'induction se transmet plus facilement d'un

liquide à un autre, lorsque l'arc métallique de cuivre, de fer ou de zinc qui réunit les deux liquides étant terminé par une pointe d'un côté et par une plaque de l'autre, le courant passe du premier liquide dans la lame, et de la pointe dans le deuxième liquide. Le platine agit en sens contraire (MARIANINI, BOTTO, DE LA RIVE).

Nous plaçons à la suite de la conductibilité deux applications importantes de l'électricité dynamique, dans lesquels la conductibilité joue un rôle important.

1215. ***Machines électro-dynamiques.*** Lorsqu'un barreau de fer est environné de fils dont les bouts communiquent avec les pôles d'une pile, les deux extrémités du barreau prennent des pôles magnétiques qui dépendent du sens de l'enroulement du fil et de la direction du courant. Si à l'aide d'un commutateur on change alternativement le sens du courant, chaque extrémité du barreau changera alternativement de pôle, et si près d'un de ces pôles variables se trouvait celui d'un aimant, naturel ou artificiel, il serait alternativement attiré et repoussé. C'est sur ce principe que sont construites les machines dont il est question. La première a été exécutée par M. Jacobi; l'effet utile qu'elle produisait était représenté par 6 kilogr. élevés à $0^m,33$ par seconde, ce qui correspond tout au plus à 1/6 de la force d'un homme. La fig. 1016 représente une disposition très-simple pour réaliser le mouvement dont il est question. ACB est une barre de fer courbée en fer à cheval et dont les deux branches sont environnées d'un même fil recouvert de soie; entre les deux branches A et B se trouve une capsule en bois D, divisée en deux parties égales par un diaphragme en bois qui s'élève à quelques millimètres; l'axe en cuivre qui supporte la boîte, la traverse et porte un électro-aimant horizontal DE, qui peut facilement tourner autour d'elle; les deux extrémités du fil qui environnent l'électro-aimant horizontal descendent verticalement de manière à plonger dans du mercure qui remplit les deux compartiments de la boîte, et qui s'élève dans chacun à une hauteur suffisante pour laisser à découvert le bord supérieur de la cloison. L'extrémité M du fil qui environne successivement les deux branches A et B du fer à cheval, communique avec un des pôles de la pile, l'autre est en contact avec le mercure d'un des compartiments de la boîte; l'autre compartiment communique avec le second pôle de la pile. On voit par cette disposition que le courant arrive toujours dans le même compartiment de la boîte, qu'il sort par l'autre, et que le circuit n'est fermé que par le fil qui s'enroule autour du cylindre DE.

Il résulte de là que les extrémités de l'électro-aimant mobile prendront des pôles contraires, quand les extrémités du fil plongeront dans des compartiments différents de la boîte; et si la boîte est placée de manière que ces changements aient lieu quand les pôles des aimants sont le plus rapprochés, il est évident que le barreau mobile prendra un mouvement de rotation continu. M. Bourbouze construit des appareils électro-magnétiques disposés d'une autre manière (fig. 1017), et qui produisent un certain effet dynamique: ABC est un balancier à chaque extrémité duquel sont suspendus deux cylindres de fer doux engagés dans deux tuyaux de cuivre fixes, environnés dans toute leur longueur d'un même fil couvert de soie, les extrémités d'un fer à cheval en fer doux sont engagées dans la partie inférieure des cylindres, et s'élèvent à moitié de leur hauteur. Il est évident, d'après cette disposition, que si les fers à cheval qui se trouvent de chaque côté du balancier sont aimantés successivement, les cylindres de fer mobiles seront attirés alternativement de chaque côté, et que le balancier prendra un mouvement oscilatoire. Pour satisfaire à cette condition, les fils qui environnent chaque couple de cylindre reçoivent alternativement le courant, au moyen d'un commutateur placé sur l'axe de rotation. Cet appareil, que la figure représente à 1/20, fait mouvoir une petite pompe.

Ce n'est point ainsi qu'ont été disposés les appareils de M. Jacobi, et de plusieurs autres physiciens qui ont cherché à obtenir de grands effets. Imaginons deux grands plateaux de bois circulaires, verticaux, les centres placés sur le même axe, l'un fixe, l'autre mobile, et portant un même nombre de barreaux de fer, courts et perpendiculaires à leur surface. Un même fil environne, et dans le même sens, les barreaux d'un même plateau, de manière que le courant en parcourant le fil produise des pôles de même nom dans les extrémités situées d'un même côté du plateau; un commutateur placé sur l'axe de rotation change le courant dans le fil du plateau mobile, à chaque passage des électro-aimants mobiles devant ceux du plateau fixe. Il résulte de cette disposition, que le plateau mobile prendra un mouvement de rotation continu. Ces appareils n'ont jamais produit qu'un très-faible travail, à cause des courants d'induction qui se développent dans les fils des électro-aimants fixes par les changements de direction du courant autour les électro-aimants mobiles, courants qui diminuent l'aimantion des premiers dans les circonstances où elle a le plus d'influence. Quand on con-

sidère le prix si modique du travail produit par les machines à vapeur, le prix élevé des matières consommées par les piles, les résultats si peu satisfaisants obtenus jusqu'ici avec les machines électro-magnétiques, et enfin la cause de leur peu de succès qu'il paraît impossible de détruire, il doit rester peu d'espoir que ces machines puissent jamais entrer en concurrence avec les machines à vapeur, comme quelques physiciens l'avaient espéré. Le travail d'un cheval-vapeur dans un heure représente celui qu'il faudrait employer pour élever 75 kilogr. $\times$ 3600 = 270,000 kilogr. à un mètre de hauteur, et ce travail exige de 3 à 4 kilogr. de houille, qui, au prix de ce combustible à Paris, coûtent de 15 à 20 centimes.

1216. *Télégraphes électriques.* Depuis quelques années on s'est beaucoup occupé de la construction des télégraphes électriques : des essais ont été faits en France et à l'étranger sur de très-grandes distances, et on peut maintenant considérer le problème comme résolu, même sous le point de vue des détails d'exécution.

Voici la disposition de l'appareil. Un fil de cuivre de 4 à 5 millimètres de diamètre s'étend entre les deux stations ; il repose de 10 mètres en 10 mètres sur des poulies de porcelaine à gorge soutenues par des poteaux en bois. Les extrémités du fil communiquent avec la terre, dont la résistance peut être considérée comme nulle. A chaque station le circuit est interrompu par un appareil particulier. Au point de départ se trouve un cercle en cuivre horizontal, de 0^{m},30 de diamètre, portant à sa circonférence les lettres de l'alphabet, des trous correspondants, et au centre une manivelle garnie d'une cheville destinée à entrer dans les trous du plateau ; ce cercle est mobile autour de son centre, et porte à sa circonférence des dents qui correspondent aux lettres ; les intervalles des dents sont remplis de bois. Une pile à courant constant est placée à côté, et ses pôles communiquent l'un avec la terre, l'autre avec un ressort qui s'appuie contre les dents du cercle. Quand on veut transmettre le signal correspondant à une lettre, on amène la manivelle sur le trou placé en face de cette lettre, et on fait tourner le plateau sur lui-même jusqu'à ce que la manivelle revienne à son point d'arrêt ; dans ce mouvement il se produit autant d'intermittences qu'il y a de lettres depuis le point d'arrêt jusqu'à celle qui doit être transmise. A l'autre station, l'appareil se compose de deux petits électro-aimants parallèles, s'aimantant dans le même sens, et d'une plaque de fer mobile autour d'un axe horizontal, placée devant les barreaux de fer et à une petite distance :

quand le courant parcourt les fils, la plaque s'applique contre les barreaux; quand il cesse, elle s'en écarte et reprend sa position naturelle; ces petits mouvements se communiquent, à l'aide d'un échappement, à une aiguille qui parcourt un cadran où les lettres sont disposées comme dans le plateau de l'autre station. Il résulte de là, que l'aiguille s'arrête exactement sur la lettre qui était en regard de la manivelle du plateau de la première station. Le même circuit pourrait évidemment servir pour le retour des signaux. Nous regrettons que les limites dans lesquelles nous devons nous renfermer ne nous permettent pas de donner une description complète des appareils, et de parler de beaucoup de perfectionnements imaginés par M. Bréguet, qui a construit le télégraphe électrique de Rouen; nous dirons seulement que cet habile ingénieur a construit des appareils destinés aux chemins de fer qui indiquent dans les points extrêmes l'instant de l'arrivée du convoi dans chaque station intermédiaire, et qu'il a remplacé la pile par un aimant qui tourne devant deux bobines garnies de fils communiquant avec celui qui est établi entre les deux stations : les mouvements de la plaque oscillante sont alors produits par les courants d'induction, alternativement de signes contraires.

Les télégraphes électriques ont sur ceux qui existent, l'avantage de transmettre presque instantanément les signaux, de n'être interrompus ni par les brouillards ni par la nuit, et de ne point exiger de stations intermédiaires, même pour les plus grandes distances, attendu qu'on est toujours maître de donner à l'électro-moteur la puissance nécessaire pour vaincre la résistance que le fil doit parcourir.

Dans les premiers essais, les fils étaient renfermés dans des tuyaux placés sous le sol; mais cette méthode avait le grave inconvénient de diminuer de beaucoup l'intensité du courant par la transmission de l'électricité au sol, malgré toutes les précautions relatives à l'isolement du fil. On avait pensé aussi à former un circuit métallique complet : c'est principalement les expériences de M. Jacobi et de M. Matteucci qui ont établi ce fait si important pour les télégraphes électriques, que la résistance du sol peut être considérée dans toutes les circonstances comme parfaitement nulle, de sorte qu'un circuit complété par la terre est plus puissant que s'il l'était par un fil de cuivre, même d'un très-grand diamètre; mais il faut que les communications soient établies par de larges plaques métalliques plongeant dans des puits. M. Bain de Birmingham a fait une expérience bien remarquable au sujet de la

conductibilité de la terre : il a enterré les deux plaques d'un couple dans la terre à la distance d'un mille anglais et en les réunissant par un fil, il a obtenu un courant intense.

Lorsqu'un circuit est complété par la terre, on peut supposer qu'elle propage le courant comme un corps bon conducteur ; mais il est plus probable qu'elle absorbe les électricités de signes contraires développés aux extrémités de la pile.

Les physiciens qui se sont le plus occupés de la construction des télégraphes sont MM. Steinheil, Wheatstone, Jacobi, et en France M. Bréguet.

§ 14. *Poissons électriques.*

1217. On connaît maintenant cinq poissons qui jouissent de la propriété singulière de donner des commotions électriques : ce sont la *raya torpedo*, le *gymnotus electricus*, le *silurus electricus*, le *tetrodon electricus* et le *trichiurus electricus*. Tous sont dépourvus d'écailles ; le plus grand est le gymnote : M. de Humboldt en a vu de $2^m,43$ de longueur. La torpille est une espèce de raie, assez abondante dans la Méditerranée et sur les bords de l'Océan, où il existe des bas-fonds marécageux ; sa longueur varie ordinairement de 16 à 32 centimètres.

1218. Lorsqu'on touche l'animal directement, ou avec un corps bon conducteur de l'électricité, et qu'il est irrité, on éprouve une commotion semblable à celle qui résulte de la décharge d'une bouteille de Leyde ; en le touchant avec un corps mauvais conducteur, on n'éprouve rien ; quand deux personnes se tiennent par la main, et que l'une d'elles seulement touche l'animal, toutes deux reçoivent la commotion. D'après Valsh, le ventre et le dos ont des tensions électriques de signes contraires : vingt personnes qui se tenaient par la main, et dont les deux placées aux extrémités de la chaîne touchaient, l'une le dos, l'autre le ventre d'une torpille, éprouvèrent toutes la commotion. Si l'animal est vigoureux, il agit de la même manière, qu'il soit plongé dans l'eau ou dans l'air ; dans l'eau, il lance à distance des décharges qui tuent, ou du moins engourdissent les animaux dont il veut faire sa proie.

1219. Ces commotions sont souvent très-fortes : M. de Humboldt affirme n'avoir jamais reçu par la décharge d'une grande bouteille de Leyde une commotion plus effrayante que celle qu'il ressentit en plaçant par mégarde ses deux pieds sur un gymnote

qu'on venait de retirer de l'eau; il fut affecté le reste du jour d'une violente douleur dans les genoux et dans presque toutes les jointures.

Pour donner une idée plus exacte de la puissance des décharges électriques de ces animaux, nous rapporterons un passage de M. de Humboldt sur la pêche du gymnote :

« Nous partîmes le 9 mars de grand matin pour le petit village de Rastro de Abaso; de là les Indiens nous conduisirent à un ruisseau qui, dans le temps des sécheresses, forme un bassin d'eau bourbeuse, entouré de beaux arbres. Les Indiens nous dirent qu'ils allaient pêcher avec des chevaux; et bientôt nous vîmes nos guides revenir de la savane, où ils avaient fait une battue de chevaux et de mulets non domptés. Ils en amenèrent une trentaine, qu'on força d'entrer dans la mare.

« Le bruit extraordinaire causé par le piétinement des chevaux fait sortir les poissons de la vase et les excite au combat. Ces anguilles, jaunâtres et livides, semblables à de grands serpents aquatiques, nagent à la surface de l'eau, et se pressent sous le ventre des chevaux et des mulets. Une lutte entre des animaux d'une organisation si différente offre le spectacle le plus pittoresque. Les Indiens, armés de harpons et de roseaux longs et minces, ceignent étroitement la mare; quelques-uns d'entre eux montent sur les arbres dont les branches s'étendent horizontalement au-dessus de la surface de l'eau; par leurs cris sauvages et la longueur de leurs joncs ils empêchent les chevaux de se sauver en atteignant la rive du bassin. Les anguilles, étourdies du bruit, se défendent par la décharge réitérée de leurs batteries électriques; pendant longtemps elles ont l'air de remporter la victoire. Plusieurs chevaux succombent à la violence des coups invisibles qu'ils reçoivent de toutes parts dans les organes les plus essentiels à la vie; étourdis par la force et la fréquence des commotions, ils disparaissent sous l'eau. D'autres, haletants, la crinière hérissée, les yeux hagards et exprimant l'angoisse, se relèvent et cherchent à fuir l'orage qui les surprend : ils sont repoussés par les Indiens au milieu de l'eau. Cependant un petit nombre parvient à tromper l'active vigilance des pêcheurs; on les voit gagner la rive, broncher à chaque pas, s'étendre dans le sable, excédés de fatigue et les membres engourdis par les commotions électriques des gymnotes : en moins de cinq minutes, deux chevaux s'étaient noyés.

« Nous ne doutions pas que la pêche ne se terminât par la mort

successive des animaux qu'on y emploie; mais peu à peu l'impétuosité de ce combat inégal diminue; les gymnotes fatigués se dispersent; ils ont besoin d'un long repos et d'une nourriture abondante pour réparer ce qu'ils ont perdu de force galvanique. Les mulets et les chevaux parurent moins effrayés; ils ne hérissaient plus la crinière, leurs yeux exprimaient moins d'épouvante. Les gymnotes s'approchaient timidement des bords du marais, où on les prit au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes. »

1220. Les décharges des poissons électriques dépendent de leur volonté. L'électricité dans ces animaux paraît se produire dans des organes particuliers, formés d'une infinité de petits tubes réunis, comme les alvéoles des abeilles. Ces appareils électriques sont placés, dans la torpille, de chaque côté de la tête; dans le gymnote, sous la queue, et dans le silure, autour du corps.

1221. La torpille a été beaucoup plus observée que les autres poissons électriques. Voici les principaux faits constatés par divers physiciens. MM. Gay-Lussac et de Humboldt ont reconnu qu'une personne isolée ne ressent la commotion qu'autant que le contact avec le doigt est immédiat : elle n'a pas lieu par l'intermédiaire d'un corps métallique. Ils n'ont pu reconnaître aucun effet de tension électrique à l'instant où la torpille donne la commotion. Davy, en mettant des plaques de cuivre en contact, l'une avec la partie supérieure du corps, l'autre avec la partie inférieure, et communiquant entre elles par un long fil de cuivre tourné en hélice autour d'un tube de verre, est parvenu à aimanter des aiguilles d'acier; il obtint de la même manière la déviation de l'aiguille d'un multiplicateur, et parvint aussi à produire de faibles actions chimiques; mais ces résultats pouvaient être compliqués de l'inégalité des actions développées au contact des lames de cuivre et de la peau de l'animal. Les tentatives faites dans le but d'obtenir des effets d'ignition ou des étincelles ont été infructueuses. Récemment MM. Becquerel et Breschet ont reconnu que la commotion a lieu quand l'animal est irrité, quel que soit le point touché, pourvu qu'il ne soit pas sur la queue, et qu'elle est d'autant plus grande que la surface de contact est plus étendue. En mettant en contact avec le dos et le ventre d'une torpille deux plaques de platine soutenues par des manches isolants et soudées chacune avec un fil de platine, dont l'un communiquait avec un multiplicateur à fil long et verni, et l'autre avec un vase plein d'eau pure en rapport avec l'autre extrémité du multiplicateur, on a obtenu des déviations de l'aiguille comprises entre

5° et 40°. Les plaques en contact avec l'animal étaient en platine pour éviter les effets qui auraient pu provenir d'une action chimique si on eût employé des métaux oxydables. On avait placé de l'eau dans le circuit pour intercepter les courants thermo-électriques, s'il s'en développait. En remplaçant le multiplicateur par une spirale, on a aimanté des aiguilles : le courant était toujours dirigé du dos au ventre. Enfin, plus récemment encore, MM. Linari et Matteucci sont parvenus à obtenir des étincelles et des décompositions chimiques en employant un fil très-long (300^{m}) tourné en hélice autour d'un morceau de fer, établissant les communications entre le dos et le ventre par de larges plaques métalliques, et plaçant dans le circuit un petit godet plein de mercure. Une grenouille récemment préparée et placée sur le poisson indiquait par ses mouvements les époques des décharges, et en enlevant à cet instant un des fils qui plongeaient dans le mercure, et le replongeant immédiatement, on obtenait des étincelles et la décomposition de l'eau acidulée. Ces physiciens ont trouvé, comme MM. Becquerel et Breschet, que le courant va du dos au ventre. Les mêmes physiciens ont fait une expérience qui démontre avec la dernière évidence l'influence du cerveau sur les décharges. Lorsqu'une torpille ne donne plus de décharges malgré l'irritation, si l'on met le cerveau à découvert et si l'on touche légèrement le dernier lobe, celui qui donne les nerfs à l'organe électrique, on obtient des décharges beaucoup plus fortes qu'à l'ordinaire; si l'on blesse le cerveau, on obtient encore des décharges très-fortes, mais dans lesquelles le courant n'a pas toujours la direction du dos au ventre.

D'après M. Matteucci, la plus grande commotion a lieu quand on touche à la fois le dos et le ventre, ou directement, ou avec un corps bon conducteur. Elle est encore très-vive quand la torpille, n'étant point isolée, on touche seulement un point de la surface de l'animal, parce que la communication avec d'autres points est établie par le sol. Quand la torpille est isolée, on obtient encore des commotions en touchant deux points du dos; le courant est alors dirigé de celui qui est le plus voisin du centre de l'organe électrique à l'autre. Nous renvoyons, pour plus de détails, aux deux ouvrages de M. Matteucci, que nous avons indiqués précédemment [1130].

§ 15. *Observations sur l'électricité dynamique.*

1222. Dans la longue série de faits que présente l'électricité

dynamique, nous avons vu le mouvement, la chaleur, les actions chimiques, le magnétisme, être tantôt la cause de production des courants, tantôt des effets produits par les courants : ainsi, l'électricité est intimement liée au principe de la chaleur et du magnétisme, et à la constitution intime des corps. Il l'est également au principe de la lumière, puisque l'électricité produit de la lumière et que les courants électriques exercent une action directe sur la lumière, comme nous le verrons bientôt. Ainsi, l'électricité tient à tout, et nous ne parviendrons à découvrir sa nature et sa manière d'agir, sans découvrir en même temps la nature de la chaleur et la constitution des corps.

1223. Dans certains cas, la production de l'électricité statique paraît résulter uniquement du contact; mais, dans un système de corps qui se touchent, de quelque manière qu'ils soient disposés, s'ils n'éprouvent aucun changement, il est impossible d'admettre qu'il puisse se produire autre chose qu'un certain état d'équilibre entre les électricités développées. Pour que le système soit parcouru par un courant permanent, il faut une source d'électricité aussi permanente, et jusqu'ici ces sources n'ont été trouvées que dans le mouvement des corps, dans celui de la chaleur qui les traverse, ou dans les actions chimiques.

1224. A part les lois des actions des courants les uns sur les autres et sur les aimants, les lois de la conductibilité, celles relatives à la chaleur développée, et aux actions chimiques produites dans un même circuit, qui paraissent bien établies, la science ne présente que des faits isolés, qui dépendent certainement les uns des autres, mais par des liens encore inconnus.

1225. Lorsque l'électricité est en repos dans un corps conducteur, les molécules jouissent d'une force répulsive qui les rejette à la surface du corps où elles sont maintenues par la résistance de l'air, en produisant à chaque point des tensions qui dépendent des courbures que la surface y affecte; mais, quand l'électricité s'écoule par un canal conducteur, les tensions latérales ne subsistent plus, car le courant est le même dans tous les points de la section du canal, pourvu qu'elle soit homogène. Et il n'y a aucun rapport entre les lois de l'action de deux éléments de courants, et les lois des attractions et des répulsions de l'électricité en repos.

1226. Les actions des courants pour produire les déviations de l'aiguille aimantée ou des décompositions chimiques paraissent

suivre les mêmes lois; mais les effets physiologiques et l'aimantation des aiguilles suivent ensemble des lois différentes.

1227. Les phénomènes d'induction ont une certaine analogie avec la production de l'électricité statique par influence; mais il s'en faut qu'elle soit complète, et on ignore s'il existe une relation entre les courants qui se produisent par induction et la polarité magnétique qui se produit dans les mêmes circonstances, mais seulement dans certains corps; et les tourbillons moléculaires, imaginés par Ampère pour expliquer l'action réciproque des courants et des aimants, quoique satisfaisant parfaitement aux phénomènes observés, sont assez difficiles à admettre.

1228. Depuis une vingtaine d'années, la science de l'électricité a marché rapidement : d'importantes découvertes ont reculé les bornes de nos connaissances; mais ce qui reste à faire pour vérifier une masse de faits isolés, pour en déterminer les lois, et pour trouver le lien qui les enchaîne, offre un champ immense aux recherches des savants.

CHAPITRE VI.

DE LA LUMIÈRE.

1229. Plusieurs systèmes ont été émis sur la nature de la lumière : Descartes supposait que l'univers est rempli d'un fluide extrêmement subtil et élastique, désigné sous le nom d'*éther*, et que les corps lumineux éprouvent des vibrations qui se propagent à travers l'éther, comme les ondes sonores à travers l'air; Newton admettait, au contraire, que la lumière est due à une émission de particules que les corps lumineux lancent continuellement dans toutes les directions. Nous décrirons d'abord les phénomènes que présente la lumière, sans admettre aucune hypothèse sur sa nature, et nous examinerons ensuite ces deux systèmes, entre lesquels les physiciens ont cessé d'être partagés.

§ 1er. *Phénomènes généraux.*

Transmission.

1230. ***Dans un milieu homogène la lumière se transmet en ligne droite.*** En effet, si l'on fait pénétrer un petit faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, la poussière en suspension dans l'air étant éclairée laisse apercevoir la route de la lumière, et on reconnaît facilement qu'elle est rectiligne. Quand on interpose un corps opaque sur la ligne droite qui joint l'œil avec le corps lumineux, la lumière est interceptée. Si le milieu n'était pas homogène, et si la lumière le traversait dans une direction oblique aux surfaces de séparation des parties homogènes, nous verrons bientôt que le rayon changerait de direction à chaque passage d'une partie homogène dans la suivante, et que, s'il y avait continuité dans les changements de densité, la lumière parcourrait une ligne courbe : c'est ce qui arrive, par exemple, pour tous les rayons de lumière qui nous arrivent à travers l'atmosphère dans une direction inclinée à la verticale. Nous verrons aussi, en parlant de la diffraction, que la lumière qui rase les bords des corps, et celle qui passe par des orifices très-étroits, ne se propagent pas non plus en ligne droite.

1231. ***L'intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance au point lumineux, quand il n'y a point de lumière absorbée par le seul fait de la transmission.*** En effet, si on conçoit deux sphères de rayons différents décrites autour d'un point lumineux, chacune recevra toute la lumière émanée du point lumineux ; et une même étendue prise sur chacune d'elles recevra une quantité de lumière en raison inverse de l'étendue de la surface de la sphère sur laquelle elle est placée, c'est-à-dire en raison inverse du carré de la distance au point lumineux.

La loi précédente n'est exacte que quand la lumière se meut dans le vide : car, lorsqu'elle passe à travers des milieux diaphanes, gazeux, liquides ou solides, une partie plus ou moins grande est absorbée, et alors l'intensité de la lumière décroît suivant une loi plus rapide ; cependant on peut la regarder comme vraie dans l'air, lorsque les distances sont petites et peu différentes. Il résulte de la loi de propagation de la lumière, que l'éclat d'un corps est indépendant de sa distance à l'œil, car son étendue apparente varie avec la distance dans le même rapport que l'intensité de ses rayons.

1232. ***Mesure de l'intensité de deux lumières*** (***photomètres***).

Pour estimer le rapport des intensités de deux lumières, on place un corps opaque en avant d'un carton blanc, vertical, éclairé par les deux lumières : chacune d'elles projette une ombre du corps sur le carton, et chaque ombre est éclairée par l'autre lumière; on change les distances relatives des deux lumières, jusqu'à ce que les ombres aient la même intensité; alors les intensités des deux lumières sont évidemment en raison directe des carrés de leurs distances aux ombres qu'elles éclairent. Il faut avoir soin de placer le corps opaque très-près de l'écran, afin que les pénombres aient peu d'étendue, et de rapprocher les ombres de manière à les rendre tangentes. Quand les lumières ont la même teinte, on apprécie avec une très-grande justesse l'égalité des ombres; mais, quand les lumières ont des teintes différentes, cette différence existe aussi dans les ombres, et il est alors beaucoup plus difficile de se prononcer sur leur intensité.

On peut employer cette méthode pour vérifier la loi de la propagation. Des bougies sont placées les unes derrière les autres, de manière à former deux groupes dont les flammes, pour chacun, soient très-voisines, à la même hauteur, et dans un même plan avec le corps qui doit porter l'ombre sur l'écran. En disposant les groupes de manière que les ombres soient égales, on trouve que les carrés de leurs distances aux centres des groupes sont sensiblement proportionnels au nombre de bougies qu'ils contiennent. L'expérience ne pourrait pas être faite avec des chandelles, parce que l'intensité de leur lumière est trop variable.

On pourrait aussi se servir du moyen suivant : une feuille de papier tendue sur un cadre est divisée en deux parties égales par un carton vertical perpendiculaire à sa direction et noirci sur les deux faces; les lumières que l'on veut comparer éclairent chacune des parties de la feuille de papier, et on se place derrière pour juger l'égalité des teintes, quand elle a été obtenue par l'éloignement progressif de celle qui a la plus grande intensité. Ce procédé est moins commode et moins exact que le premier. Nous indiquerons dans la suite d'autres espèces de photomètres fondés sur d'autres principes.

1233. *Vitesse de la lumière.* La vitesse de la lumière étant très-grande, on ne peut pas la mesurer à la surface de la terre, parce que les distances y sont trop petites; la détermination de cette vitesse ne peut se faire que par des observations astronomiques. Jupiter est accompagné de plusieurs satellites qui circulent autour de

lui; le premier effectue sa rotation en 42 heures 1/2 : par conséquent, si l'on observe l'instant où il s'éclipse en entrant dans le cône d'ombre que Jupiter projette derrière lui, l'instant de l'immersion apparente aura lieu après celui de l'immersion réelle, de tout le temps que la lumière met à parcourir la distance qui sépare Jupiter de la terre; si cette distance était constante, les éclipses se succéderaient à des intervalles exacts de 42 heures 1/2. Mais, si la première observation a eu lieu lorsque la terre était au point de son orbite le plus rapproché de la planète, et la dernière lorsqu'elle en était le plus éloignée, on trouve que l'intervalle entre la première et la dernière observation ne renferme pas un nombre exact de fois 42 heures 1/2; il y a un excédant de 16′ 26″ : or cet excédant ne peut provenir que des retards qui se sont accumulés à mesure que la terre s'éloignait de Jupiter, et il est évidemment égal au temps que la lumière a mis à parcourir le diamètre de l'orbite terrestre. En observant la dernière éclipse, lorsque la terre ne s'est éloignée que d'une partie du diamètre de son orbite, on trouve que le temps employé par la lumière pour parcourir cet espace est la même fraction du temps qu'elle met à parcourir le diamètre total : par conséquent, la vitesse de la lumière est constante. Comme le diamètre parcouru dans 16′ 26″ est de 68 à 69 millions de lieues, la vitesse de la lumière est d'environ 80000 lieues de 4000^{m} par seconde. Ce qui précède suppose nécessairement que la planète est immobile, ou du moins que son mouvement est peu considérable pendant une demi-année; c'est en effet ce qui existe, car Jupiter met à peu près douze années à parcourir son orbite : ainsi il n'en décrit qu'un vingt-quatrième pendant que la terre passe d'une extrémité à l'autre du diamètre de son orbite.

1234. Nous verrons plus tard que la lumière blanche est formée de lumières de toutes les couleurs; on pourrait alors se demander si les rayons de différentes teintes ont la même vitesse; l'observation suivante prouve avec la dernière évidence qu'il en est ainsi. Quand les satellites de Jupiter passent devant cette planète, ils projettent sur son disque une ombre qui marche avec le satellite : or, si les rayons de différentes couleurs allaient inégalement vite, l'ombre laisserait après elle des franges colorées, et on n'en aperçoit aucune trace.

Pour comprendre l'énormité de la vitesse de la lumière, il faut la comparer à celles que nous regardons comme très-grandes. Un boulet de canon emploierait plus de dix-sept ans pour atteindre le

soleil, en lui supposant pendant toute sa course la vitesse dont il était animé au moment de la décharge; et cependant la lumière parcourt le même espace en 8 minutes et demie. L'oiseau dont le vol est le plus rapide mettrait près de trois semaines à faire le tour du globe, tandis que la lumière franchit le même espace en beaucoup moins de temps qu'il n'en faut à l'oiseau pour faire un simple battement d'ailes.

1235. Le défaut d'instantanéité dans la transmission de la lumière donne naissance à un phénomène fort remarquable que nous devons indiquer. Lorsqu'un rayon de lumière émané d'un astre quelconque vient frapper l'œil d'un observateur, si l'observateur est immobile, il voit l'astre dans la direction du rayon qu'il en reçoit; mais s'il est en mouvement, il voit l'astre dans la direction de la diagonale du parallélogramme formé sur deux lignes, dont l'une représente la vitesse de la lumière, et l'autre la sienne propre. Il résulte de là que le lieu apparent des astres diffère du lieu vrai; que la grandeur de l'écart dépend du rapport de la vitesse de la lumière à celle de l'observateur, et des directions de ces vitesses. Des deux mouvements de la terre il n'en est qu'un seul dont la vitesse soit comparable à celle de la lumière, et qui ait une influence sensible : c'est le mouvement dans l'écliptique. Ce phénomène, découvert par Bradley, porte le nom d'*aberration*. C'est en vertu de l'aberration que les étoiles fixes paraissent décrire chaque année, dans le ciel, de petites ellipses. Dans le calcul de l'aberration, après avoir corrigé les observations de l'influence de la réfraction atmosphérique, il faut avoir égard non-seulement à la vitesse de la lumière, à celle de la terre, mais encore à la vitesse de translation de l'astre, quand sa vitesse est comparable à celle de la lumière.

1236. *Ombre.* Considérons un point lumineux éclairant, et un corps opaque quelconque; par le point lumineux comme sommet (fig. 721), concevons un cône qui enveloppe et touche le corps : la ligne de contact séparera évidemment la partie du corps qui reçoit de la lumière de celle qui n'en reçoit pas; le cône au delà du corps renferme un espace dans lequel la lumière ne pénètre pas : cet espace forme l'ombre du corps.

1237. *Pénombre.* Lorsqu'un corps lumineux a des dimensions finies, la séparation de l'ombre et de la lumière sur un corps quelconque qu'il éclaire n'a pas lieu brusquement. Supposons, par exemple, que le corps lumineux soit une sphère A (fig. 722), et le corps éclairé une sphère B; menons les deux cônes tangents aux

deux sphères, et soient *ab* et *cd* les deux cercles de contact : il est évident que tous les points de la sphère B situés en avant de *ab* recevront la plus grande quantité de lumière; que tous les points de la sphère B situés derrière le cercle *cd* ne recevront aucun rayon lumineux; et que les points situés entre les cercles *ab* et *cd* recevront une quantité de lumière décroissante à mesure qu'ils s'approcheront davantage de *cd*. L'intervalle compris entre *ab* et *cd*, dans lequel a lieu la dégradation de la lumière, a reçu le nom de *pénombre*. L'espace situé derrière la sphère B est aussi composé d'un espace O, où la lumière ne pénètre pas, qui est infini quand le corps opaque est plus grand que le corps lumineux, et fini (fig. 723) dans le cas contraire. Cet espace est environné d'un autre, N, qui n'est éclairé que par une partie du corps lumineux, et qui est infini dans tous les cas.

Cette détermination géométrique de l'ombre et de la pénombre projetées derrière un corps n'est pas cependant rigoureusement exacte, parce que les rayons de lumière s'infléchissent en passant contre les corps; mais comme cette inflexion est très-faible, l'ombre réelle diffère peu de celle qui résulte de la construction géométrique dont nous venons de parler, excepté pourtant dans quelques circonstances particulières, dont il ne sera question que quand nous parlerons de la diffraction.

1258. Il résulte de ce qui précède que, si l'on perçait une ouverture d'une forme quelconque dans un écran éclairé par un seul point lumineux, le faisceau de lumière projeté derrière l'ouverture serait un cône ayant pour base l'orifice, et pour sommet le point lumineux : par conséquent, si on plaçait un écran derrière l'orifice, la partie éclairée aurait la forme de l'orifice. Mais, si le corps lumineux avait des dimensions finies, l'image reçue sur l'écran aurait la forme du corps lumineux, quelle que fût d'ailleurs celle de l'orifice, pourvu que l'écran en fût suffisamment éloigné. En effet, pour avoir l'image formée sur l'écran, il faut, par un point quelconque de la circonférence du corps lumineux, et par l'orifice, mener un cône, et faire promener le sommet de ce cône sur toute la circonférence du corps lumineux : on voit alors facilement que la surface qui résulte de ce mouvement est une espèce de cône à deux nappes, ayant pour sommet l'orifice, et dans lequel les sections perpendiculaires à l'axe s'approchent d'autant plus de celle du corps lumineux qu'elles sont plus éloignées de l'orifice. C'est ainsi que les rayons du soleil qui passent à travers les intervalles des

feuilles forment sur le sol des images circulaires ou elliptiques, suivant l'inclinaison des rayons, et qui durant les éclipses ont la forme apparente du soleil.

1239. *L'intensité de la lumière émise par un même corps est proportionnelle au sinus de son inclinaison sur la surface.* Une surface lumineuse paraît également brillante, quelle que soit l'inclinaison sous laquelle elle se présente. Il faut nécessairement conclure de là, que le rapprochement des rayons, lorsque la surface est oblique, se trouve compensé par la diminution de leur intensité. On trouve, par le même raisonnement que pour la chaleur [486], que l'intensité doit varier proportionnellement au sinus de l'angle avec la surface. Il résulte de là, et de la loi du décroissement d'intensité de la lumière en raison du carré de la distance [1231], qu'un corps lumineux conserve toujours le même éclat, quelles que soient sa distance à l'œil et sa position.

On désigne sous le nom de *corps opaques* ceux qui ne peuvent point être traversés par la lumière; sous celui de *corps transparents* ou *diaphanes* ceux à travers lesquels la lumière peut facilement se propager; et enfin, sous le nom de *corps translucides* ceux qui ne laissent passer que de la lumière diffuse.

Réflexion.

1240. Si l'on fait pénétrer un rayon solaire dans une chambre obscure, et que, sur son trajet, on place un corps poli, le rayon solaire se brise sur la surface du miroir, et porte contre les parois de la chambre une image du soleil. Lorsqu'un rayon de lumière arrivé sur la surface d'un corps se replie ainsi vers le milieu qu'il avait pénétré d'abord, la déviation qu'il éprouve porte le nom de *réflexion.* On appelle *angle d'incidence* celui du rayon incident avec la normale au point d'incidence, et *angle de réflexion* celui du rayon réfléchi avec la même normale.

1241. *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont situés dans un plan normal à la surface réfléchissante au point de réflexion, et l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.* Ces deux lois de la réflexion peuvent être constatées de la manière suivante : on place horizontalement une surface plane et polie, et verticalement un cercle gradué (fig. 724); on observe avec la lunette un objet très-éloigné et son image dans le miroir, et on reconnaît que l'objet et l'image sont dans un même plan vertical, et que les directions des rayons incidents et réfléchis sont également inclinées à l'horizon.

ır le même mode d'expérience, on peut reconnaître que le rayon fléchi sur une surface courbe a la même direction que si la surface ait remplacée par son plan tangent au point de réflexion.

1242. Ces lois de la réflexion de la lumière sont les mêmes que pour la chaleur. Il est important de remarquer qu'il résulte de ces lois, que la lumière, pour passer d'un point du rayon incident à un point du rayon réfléchi, en touchant la surface, parcourt le chemin le plus court. En effet, si des deux points donnés comme foyers, on décrit un ellipsoïde de révolution tangent à la surface réfléchissante, les deux rayons vecteurs menés par les points de tangence seront le chemin le plus court de l'un à l'autre foyer en passant par la surface réfléchissante, et ces deux lignes sont précisément disposées comme les rayons incidents et réfléchis.

1243. Il est facile de voir, d'après la loi de la réflexion, que, si un miroir avait la forme d'un ellipsoïde de révolution, et que le point lumineux fût placé à l'un des foyers, tous les rayons réfléchis iraient passer par l'autre foyer; que, pour un miroir parabolique et des rayons incidents parallèles à l'axe, les rayons réfléchis passeraient par le foyer, et que, si le point lumineux était au foyer, les rayons réfléchis seraient parallèles à l'axe.

1244. Lorsqu'un faisceau de rayons lumineux rencontre un corps, indépendamment des rayons réfléchis suivant la loi que nous venons d'énoncer, il en existe un nombre plus ou moins grand que la réflexion dissémine dans toutes les directions. Ce sont ces derniers qui rendent le corps visible des points de l'espace où ne passent pas les rayons régulièrement réfléchis. Dans le cas, par exemple, d'un petit miroir placé dans une chambre obscure et frappé par un rayon solaire, si toute la lumière était réfléchie régulièrement, le miroir ne pourrait être aperçu qu'autant que l'œil serait dans la direction du faisceau réfléchi; et encore, dans ce cas, on ne verrait qu'une image du soleil; mais la diffusion des rayons irrégulièrement réfléchis produit le même effet que si le miroir était lumineux par lui-même, et par conséquent on peut l'apercevoir de tous les points de la chambre obscure. Ainsi la réflexion irrégulière qui existe à la surface des corps est une condition nécessaire à leur visibilité : car s'ils ne réfléchissaient que régulièrement la lumière, l'œil, en recevant la lumière de ces corps, n'y verrait que des images des corps qui les éclairent, et nullement leurs images propres, à moins qu'ils ne fussent lumineux par eux-mêmes.

Les quantités de lumière réfléchie régulièrement et irrégulièrement, ne représentent pas la lumière incidente, parce qu'il y a toujours une certaine quantité de lumière absorbée par le corps. Elle est éteinte quand le corps est opaque, et ne l'est pas, du moins en totalité, quand le corps est transparent. Cette absorption de la lumière dans la réflexion, et sa prodigieuse vitesse, expliquent la disparition instantanée de la lumière dans un appartement aussitôt que les rayons directs cessent d'y arriver.

1245. On a reconnu par l'expérience, que la quantité de lumière régulièrement réfléchie sur le même corps et sous la même inclinaison augmente avec le poli de sa surface; que les corps avec le même poli et sous la même inclinaison réfléchissent des quantités inégales de lumière : ainsi, le mercure est doué d'un plus grand pouvoir réflecteur que les autres liquides; et que, pour le même corps, la quantité de rayons régulièrement réfléchis va en croissant à mesure que les rayons incidents sont plus rapprochés de la surface réfléchissante. Ce dernier fait peut être mis en évidence par une expérience très-curieuse. En plaçant l'œil très-près de la surface d'une plaque de verre dépoli, de manière à recevoir des rayons réfléchis sous une très-grande incidence, on voit des images aussi nettes que si la glace était polie. La même expérience peut être faite avec une feuille de papier.

D'après Bouguer, l'intensité de la lumière réfléchie par l'eau sous une incidence de 0°,30 à 90° varie de 18 à 721; le verre et le marbre noir offrent des variations peu différentes. Mais ces grandes variations de pouvoir réflecteur ne se manifestent que pour les corps qui réfléchissent mal la lumière; dans ceux qui ont une grande faculté réfléchissante, comme le mercure et les miroirs de télescope, la variation totale de 0° à 90°, n'est guère que de 8 à 9. Le procédé employé par Bouguer pour les corps transparents consistait à placer (fig. 725) deux petites plaques égales, et de la même substance, *m* et *n*, éclairées par une bougie *c*, symétriquement à une lame MN à faces parallèles; un écran *pq*, convenablement disposé, ne permettait à aucun rayon direct de la bougie d'éclairer la plaque MN; l'œil placé en O voyait alors directement la plaque *m* par transmission, et l'autre par réflexion, à la même distance, et l'une au-dessus de l'autre; on faisait alors varier la position de la bougie jusqu'à ce que les deux images eussent la même intensité : il est évident qu'en négligeant la quantité de lumière réfléchie à la seconde surface de la lame, l'intensité de la lumière transmise était à celle de la lumière ré-

fléchie comme les pouvoirs éclairants des plaques *n* et *m*, c'est-à-dire en raison inverse des carrés des distances de la bougie à ces plaques. La méthode la plus simple, applicable à tous les cas, consisterait dans la disposition photométrique de Bouguer [1232], en se servant de deux bougies donnant des flammes de même intensité, dont la lumière de l'une n'arriverait au corps opaque qu'après s'être réfléchie. La fig. 726 représente la disposition de l'appareil : C, C′ sont les deux bougies, AB l'écran sur lequel se projettent les ombres du corps opaque O, MN le corps réflecteur, *mn* et *pq* des écrans : il est évident que les intensités des rayons directs et réfléchis seront entre elles comme les carrés des chemins parcourus par ces rayons, depuis les points C et C′ jusqu'aux ombres qu'ils éclairent.

La réflexion de la lumière a non-seulement lieu quand un rayon passe de l'air dans un corps solide ou liquide, opaque ou diaphane, mais généralement toutes les fois qu'un rayon de lumière passe d'un corps dans un autre, quel que soit l'état de chacun d'eux.

1246. *Disposition des rayons réfléchis sur une surface plane.* Soit MN (fig. 727) une surface plane, O un point lumineux, OA un rayon incident; pour avoir la direction du rayon réfléchi, abaissons du point O une perpendiculaire OX, que nous prolongerons d'une quantité XO′ égale à XO; si nous menons O′A, je dis que AB, prolongement de O′A, sera le rayon réfléchi : en effet, l'angle *a* est égal à l'angle *b*, et ce dernier est égal à l'angle *c*. La même construction étant applicable à tous les autres rayons incidents, il en résulte que tous les rayons réfléchis, étant prolongés au-dessous de MN, vont passer par un point situé derrière le miroir, sur la perpendiculaire abaissée du point lumineux, et à la même distance du miroir que le point lumineux. Il est facile de voir que, si les rayons incidents étaient convergents, les rayons réfléchis passeraient par un point symétrique, par rapport au miroir, au point de réunion des rayons incidents prolongés : il suffit, pour s'en convaincre, de supposer dans la fig. 727 que les rayons réfléchis sont incidents, et réciproquement.

1247. *Disposition des rayons réfléchis sur un miroir sphérique.* Soit MN (fig. 729) un miroir sphérique, O son centre; supposons d'abord que les rayons partent d'un point situé à l'infini, c'est-à-dire qu'ils soient parallèles. En coupant le miroir par des plans méridiens parallèles aux rayons, et traçant dans chacun d'eux des rayons incidents très-voisins, ainsi que les rayons réflé-

chis correspondants, ces derniers se couperont deux à deux; et, en les supposant consécutifs, la série des points d'intersection formera une courbe XFY, à laquelle tous les rayons réfléchis seront tangents. Cette courbe étant la même dans tous les plans méridiens, il en résulte que les rayons réfléchis consécutifs se coupent deux à deux sur une surface de révolution autour du rayon de la sphère parallèle à la direction des rayons lumineux, et dont la génératrice est XFY : cette surface s'appelle *caustique*. Chaque point de la caustique, recevant au moins deux rayons lumineux, est plus brillant que l'espace environnant. Les rayons réfléchis sur les différents points d'un cercle quelconque situé dans un plan perpendiculaire à l'axe, passant tous par un point de l'axe, une partie de cette ligne sera aussi plus lumineuse que les autres points de l'espace; mais la lumière sera principalement accumulée au sommet de la caustique, qui se trouve dans la partie brillante de l'axe. Le sommet de la caustique porte le nom de *foyer*. On dit ordinairement que le foyer est le point où passent tous les rayons réfléchis; cette définition n'est point exacte : car il n'y a que les rayons réfléchis sur les points du miroir qui sont infiniment voisins de l'axe, qui passent réellement par le foyer; mais, quand le miroir n'a qu'une petite étendue, relativement à la sphère à laquelle il appartient, on peut admettre, sans erreur sensible, que le foyer est le point de concentration de tous les rayons réfléchis. On peut facilement reconnaître la forme de la caustique, en mettant devant un miroir concave exposé aux rayons solaires, un carton blanc dans la direction de l'axe de la caustique : on aperçoit très-nettement la section de cette surface.

1248. Les caustiques produites par la réflexion des miroirs sphériques ne sont qu'un cas particulier d'une loi beaucoup plus générale, et qui peut s'énoncer ainsi : lorsqu'une surface de forme quelconque réfléchit régulièrement des rayons émanés d'un point, on peut toujours tracer sur cette surface deux systèmes de lignes courbes se coupant à angle droit, dont chacune jouit de la propriété que tous les rayons consécutifs qui se réfléchissent sur ses différents points se coupent deux à deux, et forment une surface développable. Les arêtes de rebroussement des surfaces qui s'appuient sur les courbes appartenant à un même système, étant continues, forment également une surface continue. Les points où se coupent ces deux dernières surfaces, qu'on désigne sous le nom de *caustiques*, sont les foyers. Dans le cas de la sphère, un des systèmes de courbes est formé par les méridiens, l'autre est formé de cercles dont les centres sont sur l'axe optique; les surfaces développables du premier système sont planes, et ont pour arêtes de rebroussement des courbes

symétriques par rapport à l'axe ; les surfaces développables du second système sont des cônes ayant leur sommet sur l'axe : les deux surfaces caustiques sont donc une surface de révolution autour de l'axe, et l'axe lui-même ; leur intersection se réduit à un point qui est le sommet de la caustique, et le foyer se réduit aussi à un seul point. Les deux systèmes de courbes rectangulaires sur lesquelles s'appuient les surfaces développables coïncident avec les lignes de courbure dans le cas où la surface est sphérique ; mais dans tous les autres cas ils en diffèrent.

Il est très-facile de construire graphiquement les courbes génératrices des caustiques formées par les rayons réfléchis sur des miroirs de révolution, puisque cette courbe doit être tangente à tous les rayons réfléchis ; mais pour les miroirs sphériques on peut employer avec plus d'avantage la méthode suivante, qui est due à Petit.

Soient PA et PB (fig. 730) deux rayons lumineux consécutifs émanés du point P ; P′ l'intersection des rayons réfléchis correspondants ; P′ sera un point de la courbe génératrice de la surface de révolution ; représentons par i et r les accroissements de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion, quand le point d'incidence passe du point O au point I. L'angle d'incidence POR a pour mesure $\frac{1}{2}$ AH, et l'angle d'incidence PIS a pour mesure $\frac{1}{2}$ BD : ainsi

$$i = \tfrac{1}{2}\,\mathrm{AH} - \tfrac{1}{2}\,\mathrm{BD} = \tfrac{1}{2}(\mathrm{AB} + \mathrm{DH}).$$

L'angle de réflexion FOH a pour mesure $\frac{1}{2}$ FH ; l'angle de réflexion GID a pour mesure $\frac{1}{2}$ GD : ainsi on aura

$$r = \tfrac{1}{2}\,\mathrm{FH} - \tfrac{1}{2}\,\mathrm{GD} = \tfrac{1}{2}(\mathrm{FG} - \mathrm{DH});$$

mais, comme $i = r$, il vient

$$\mathrm{AB} + \mathrm{DH} = \mathrm{FG} - \mathrm{DH}, \text{ ou } \mathrm{AB} - \mathrm{FG} = -2\mathrm{DH} \ldots. \ (a).$$

Désignons par p la distance variable du point lumineux au point d'incidence, par p' la distance également variable de ce point d'incidence au point correspondant de la surface caustique, et par $4a$ la longueur IB ou IG : nous aurons sensiblement

$$\mathrm{AB} = \mathrm{OI}.\frac{4a + p}{p}, \quad \text{et } \mathrm{FG} = \mathrm{OI}.\frac{4a - p'}{p'};$$

alors l'équation (a) devient

$$\mathrm{OI}.\frac{4a + p}{p} - \mathrm{OI}.\frac{4a - p'}{p'} = -2\mathrm{DH} = -2\mathrm{OI},$$

ou

$$\frac{4a + p}{p} - \frac{4a - p'}{p'} = -2; \quad \text{d'où } \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{a}.$$

Si le point p était placé dans l'intérieur, il faudrait changer le signe de p, et la formule deviendrait

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}.$$

Si le point lumineux était à l'infini, on aurait $p = \infty$, et il viendrait

$$\frac{1}{p'} = \frac{1}{a}, \text{ ou } p' = a.$$

A l'aide de ces formules la courbe est très-facile à construire.

Dans le cas où le point lumineux est placé à l'infini, la caustique est une épicycloïde engendrée par un cercle dont le rayon est le quart du rayon du miroir, et qui se meut sur un cercle dont le rayon est moitié.

En effet, soit ABC (fig. 730 A) le miroir; du point O, comme centre, décrivons un cercle avec un rayon égal à la moitié de celui du miroir; par un point quelconque I menons le rayon incident IK, le rayon réfléchi IL, la ligne IO, et décrivons un cercle sur Ic comme diamètre : on aura $la = \frac{1}{4}$ IK $= a$; car, si du point a on abaisse une perpendiculaire au rayon incident, cette perpendiculaire passera par le point c, et on aura $la = dO = af = \frac{1}{4}$ IK : par conséquent le point b sera un point de la caustique. Il ne reste plus alors qu'à faire voir que l'arc Fc a la même longueur que l'arc bc ou ac; or c'est ce qui est très-facile : car, l'angle bIc étant égal à l'angle cOd, l'arc bc renferme deux fois plus de degrés que l'arc Fc; et, comme le dernier est décrit avec un rayon double, il s'ensuit que ces arcs sont égaux (M. Quet).

Lorsque le point lumineux est placé à une distance finie, les rayons réfléchis sont encore disposés de la même manière (fig. 731); mais la position du foyer varie, soit en avant, soit en arrière du miroir : dans ce dernier cas, ce sont seulement les prolongements des rayons qui se coupent, et on dit alors que le foyer est *virtuel*.

1249. Les positions relatives du point lumineux, du foyer et du miroir étant très-importantes à connaître, nous allons les décrire dans tous les cas qui peuvent se présenter; mais avant nous remarquerons qu'en vertu de la loi que suit la réflexion, si le rayon réfléchi retournait suivant la même direction, il se réfléchirait suivant la ligne d'incidence : par conséquent, le point lumineux et le foyer sont réciproques, c'est-à-dire que, si le foyer devenait lumineux, le point lumineux deviendrait le foyer; c'est pour cette raison que ces deux points s'appellent *foyers conjugués*.

Supposons d'abord que le point lumineux soit situé à l'infini (fig. 732); soit AB un rayon incident, BF le rayon réfléchi, OD l'axe optique, c'est-à-dire le rayon de la sphère parallèle aux rayons lumineux : si l'on mène le rayon OB, il est évident que l'angle b est égal à l'angle a; et, comme ce dernier est égal à l'angle c, le triangle BFO est isocèle, et BF est égal à FO, quel que soit le point B. Or, quand B est infiniment voisin de D, F est le foyer; mais alors la ligne brisée BFO est égale à DO : par conséquent, le foyer est au milieu du rayon. Dans le cas que nous considérons, le foyer

porte le nom de *foyer principal* : ainsi, le foyer principal est situé au milieu du rayon.

Supposons maintenant que le point lumineux s'avance de l'infini vers le miroir, le foyer s'avancera vers le centre et y arrivera en même temps que le point lumineux. Le point lumineux continuant son mouvement vers le miroir, le foyer s'éloignera du centre, et sera à l'infini lorsque le point lumineux sera au foyer principal. Le point lumineux dépassant le foyer principal, le foyer conjugué passera derrière le miroir, par conséquent il ne sera formé que par le prolongement des rayons et sera virtuel. Lorsque le point lumineux arrivera contre le miroir, le foyer se confondra avec lui. Si on suppose que le point lumineux continue à se mouvoir derrière le miroir, celui-ci devient convexe; le foyer repasse du côté concave, ne le quitte plus, et s'avance vers le foyer principal à mesure que le point lumineux s'éloigne. Ainsi les miroirs convexes n'ont jamais de foyers réels, et les miroirs concaves sont dans le même cas, quand le point lumineux est à une distance du miroir plus petite que la moitié du rayon.

On peut obtenir d'une manière très-simple les distances relatives des foyers conjugués au miroir dans une position quelconque du point lumineux. En effet, soit MN (fig. 133) un miroir concave sphérique, O son centre, F le point lumineux, Fm un rayon incident, mF′ le rayon réfléchi : le rayon Om divisant l'angle FmF′ en deux parties égales, on aura la proportion F′m : Fm :: F′O : FO. Or, lorsque le point m est infiniment voisin du point D, F′m et Fm se confondent avec F′D et FD : par conséquent, en désignant ces dernières quantités par p' et p, et le rayon de la sphère par $2r$, la proportion précédente deviendra

$$p' : p :: 2r - p' : p - 2r; \text{ d'où } p'(p - 2r) = p(2r - p'),$$
$$pp' - 2rp' = 2rp - pp'; \; pp' - rp' = rp;$$

et, en divisant par $pp'r$, il vient

$$(a) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{r}; \quad \text{d'où } p' = \frac{rp}{p - r}.$$

En discutant cette dernière formule, on trouverait pour p' les valeurs que nous avons indiquées précédemment.

Si dans cette formule on changeait le signe de p seulement, elle deviendrait relative au cas où les rayons qui rencontrent le miroir sont convergents au lieu d'être divergents : c'est ce qui arriverait si les rayons avaient déjà été rendus convergents par un autre miroir avant de rencontrer celui dont il s'agit. Dans ce cas la formule deviendrait

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{r}; \quad \text{d'où } p' = \frac{pr}{r + p}.$$

La formule relative aux miroirs convexes peut s'obtenir par une construction analogue à celle dont nous nous sommes servi, ou en changeant dans la formule relative aux miroirs concaves d'abord le signe de a et ensuite celui de p' pour rendre sa valeur positive; mais il faut se souvenir que le foyer est alors dans la concavité de la surface.

On peut aussi trouver les formules des foyers par une autre méthode, qu'il est bon de connaître. On a entre les angles de la fig. 734 les relations suivantes :

$$AF'm = r + c, \quad AFm = i - c;$$

observant que $r = i$, et retranchant la seconde équation de la première, il vient

$$AF'm - AFm = 2c.$$

Ces angles étant très-petits, on peut considérer les arcs comme se confondant avec leurs tangentes, et regarder Am comme une petite ligne droite perpendiculaire à FO : l'équation précédente donne alors

$$\frac{Am}{AF'} - \frac{Am}{AF} = \frac{2Am}{AO}; \text{ ou, } \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{r}.$$

Ces formules seraient applicables à des miroirs dont la surface serait engendrée par la révolution d'une courbe quelconque, pourvu que la normale de la courbe, au point où elle rencontre l'axe de révolution, fût dirigée suivant cet axe : alors r représenterait la moitié du rayon de courbure de la courbe au point de rencontre avec l'axe.

1250. La distance focale principale d'un miroir sphérique, étant égale à la moitié du rayon, peut servir à déterminer le rayon de courbure d'un miroir. L'opération est très-simple pour les miroirs concaves : il faut les exposer au soleil, chercher avec un petit écran le point où l'image est le plus vive, et mesurer la distance de ce point au miroir parallèlement à la direction des rayons solaires. Pour les miroirs convexes (fig. 734 A), il faut coller une bande de papier sur le miroir, y pratiquer deux petits trous, a et b, recevoir sur un écran les deux rayons réfléchis, et faire varier la distance de l'écran jusqu'à ce que la distance mn des deux images soit double de ab : il est évident qu'alors la ligne ab divise en deux parties égales la distance de l'écran au foyer principal.

1251. Lorsque les rayons réfléchis par un miroir ont un foyer réel, il se forme dans l'espace une image du corps lumineux que l'on peut rendre visible en plaçant un corps opaque dans le lieu qu'elle occupe ou en répandant de la poussière dans l'air : cette image est le lieu des foyers de tous les points de l'objet lumineux. Dans chaque cas particulier il sera facile de construire cette image : il faudra par chaque point du corps et le centre de la sphère mener

une droite et déterminer le point de cette ligne où se trouve le foyer. Par exemple, soit (fig. 735) AB un objet situé en avant du centre, il est évident que son image sera renversée, et d'autant plus grande qu'il sera plus voisin du centre. Si l'objet est placé entre le centre et le foyer principal, l'image sera également renversée (fig. 736) ; mais, s'il était situé entre le foyer principal et le miroir, il n'y aurait pas d'image, puisque les foyers seraient virtuels. Par la même raison, les miroirs plans et convexes ne forment point d'images dans l'espace. Ces images, quand elles existent, diffèrent de celles que l'on voit dans les miroirs, mais elles en diffèrent peu. Nous reviendrons sur cet objet après avoir parlé de la vision.

Réfraction.

1252. Lorsqu'un rayon lumineux pénètre du vide dans un milieu diaphane, ou d'un milieu diaphane dans un autre, il est dévié de sa direction et se rapproche ou s'éloigne de la normale à la surface, suivant que le second milieu est plus ou moins dense que le premier (fig. 737) : c'est cette déviation que l'on désigne sous le nom de *réfraction*. On peut la constater par l'observation suivante : si au fond d'un vase (fig. 738) on met un corps A, et que l'on se place en M de manière à voir le corps tangent au bord du vase, en y versant de l'eau le corps paraît élevé, et il faut que l'œil se place en N pour que le corps paraisse encore dans sa première position : cet effet provient évidemment de ce que le rayon AD s'incline en sortant de l'eau pour entrer dans l'air. C'est par la même raison qu'un bâton plongé en partie dans l'eau paraît brisé.

On peut aussi reconnaître directement la déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en passant d'un milieu dans un autre, en plaçant sur la route d'un rayon solaire qui pénètre dans une chambre obscure un vase formé par des plaques de verre parallèles et plein d'eau : en répandant dans ce liquide une poussière légère, on voit très-distinctement le rayon solaire dans l'air et dans l'eau, et la déviation qu'il éprouve en passant dans ce dernier milieu.

1253. *Lois de la réfraction.* On a constaté par l'expérience, 1° que le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface du corps réfringent ; 2° que le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant. L'angle d'incidence est l'angle formé par le rayon incident avec la normale à la surface au point d'incidence, et l'angle de réfraction celui qui est formé par le rayon réfracté avec

cette même normale. Ce rapport porte le nom d'*indice de réfraction*. Dans le système de l'émission, il est égal au rapport des vitesses de la lumière dans le milieu réfringent et dans le milieu environnant, et à ce rapport renversé lorsqu'on considère la lumière comme provenant des vibrations de l'éther.

Cette loi, l'une des plus importantes de l'optique, a été découverte par Descartes, au moyen de la méthode suivante : un vase de verre hémisphérique, plein d'eau, recevait au centre de la surface liquide un rayon de lumière dont la direction était connue ; un limbe mobile dont le centre coïncidait avec celui de la sphère pouvait se mouvoir autour de la verticale passant par ce centre : on cherchait le point d'émergence du rayon réfracté, et on mesurait directement l'angle qu'il faisait avec la verticale, ainsi que la position du plan du limbe par rapport au plan vertical du rayon incident.

1254. *Angle limite.* Nous avons dit que, quand un rayon passe du vide dans un corps réfringent, l'angle d'incidence est plus grand que l'angle de réfraction, et que la même chose a lieu quand le rayon passe d'un corps dans un autre plus réfringent ; réciproquement, quand un rayon sort d'un milieu réfringent pour entrer dans le vide ou dans un milieu moins réfringent, le rayon s'écarte de la normale. Ainsi il y a toujours pour chaque corps une incidence sous laquelle le rayon ne peut pas en sortir pour pénétrer dans le vide ou dans un autre corps diaphane moins réfringent, car, l'angle d'émergence (de sortie) étant toujours plus grand que l'angle d'incidence, il y a toujours une incidence plus petite que 90°, pour laquelle l'angle d'émergence est droit : cette incidence porte le nom d'*angle limite*.

Si l'on suppose que le rayon se présente pour sortir sous un angle plus grand que l'angle limite, la loi n'est plus applicable, car alors on aurait pour le sinus de l'angle d'émergence une valeur plus grande que l'unité, ce qui est impossible ; et même la formule ne peut pas indiquer ce qui arrive alors au rayon ; mais l'expérience montre qu'il se réfléchit en totalité dans l'intérieur du milieu en faisant un angle d'incidence égal à l'angle de réflexion. Ainsi, en supposant qu'un rayon CO (fig. 118 A) se présente sur la seconde surface d'un milieu diaphane, d'abord perpendiculairement, et qu'il s'incline toujours davantage sur la normale, le rayon réfracté, d'abord dirigé suivant le prolongement de la normale, s'incline plus que le rayon incident ; il coïncide avec OB quand le rayon incident est dirigé suivant EO, faisant avec OC un angle

égal à l'angle limite; mais, aussitôt que le rayon incident devient plus incliné, qu'il est dirigé suivant FO, par exemple, ce rayon est réfléchi suivant OF' incliné sur OB d'une quantité égale à l'angle FOA, et à mesure que le rayon s'incline davantage sur AO, le rayon réfléchi s'incline aussi davantage sur OB, et tous deux finissent par être dirigés suivant AB. On voit d'après cela qu'il n'y a pas continuité dans le passage de la réfraction à la réflexion intérieure.

Il résulte de là que, si un observateur était plongé dans l'eau, son œil étant en O (fig. 739), tous les rayons réfractés qui lui parviendraient seraient renfermés dans le cône droit ABO, dont l'angle COB est égal à l'angle limite; tous les points de la surface du liquide situés autour du cercle AB ne pourront transmettre à l'œil aucun rayon venu de l'extérieur; mais ces points réfléchiront comme un miroir les rayons émanés des corps situés au fond de l'eau.

Il est facile de calculer pour chaque substance le maximum de l'angle sous lequel ce phénomène doit avoir lieu, lorsqu'on connaît l'indice de réfraction d'un rayon lumineux qui passe du milieu environnant dans ce corps. En effet, ce maximum aura évidemment lieu quand l'angle d'émergence sera droit : or, en appelant θ et θ' les angles d'incidence et de réfraction, et n l'indice de réfraction, on aura $\sin\theta = n \sin\theta'$; quand le rayon sort du corps, θ se trouve l'angle d'émergence, et à la limite d'émergence il est égal à 90°, par conséquent $\sin\theta = 1$, et $\sin\theta' = \frac{1}{n}$: ainsi l'angle limite a pour sinus l'unité divisée par l'indice de réfraction. Pour le verre et le vide, par exemple, $n = \frac{3}{2}$, et $\theta' = 41° 48' 37''$: ainsi tous les rayons qui se présenteront pour passer du verre dans le vide sous une plus grande incidence seront réfléchis dans l'intérieur du verre.

Nous venons de voir que, lorsqu'un rayon tend à sortir d'un milieu réfringent sous un angle plus grand que l'angle limite, il se réfléchit; nous ajouterons que dans ce cas, la réflexion est totale, et que les images ainsi produites sont beaucoup plus brillantes que celles qu'on obtient à la surface extérieure des corps doués du plus grand pouvoir réflecteur, tels que le mercure ou les plaques métalliques dont le poli est le plus parfait. C'est ce que l'on peut facilement vérifier en mettant de l'eau dans un vase de verre (fig. 740) et plaçant l'œil en o : la surface du liquide donne les images des objets qui sont au-dessous, comme ferait un miroir; mais leur éclat est beaucoup plus vif.

1255. On a trouvé, par expérience, que, quand on applique l'une contre l'autre deux lames à faces parallèles, ayant des pouvoirs réfringents différents, les rayons incidents et émergents sont parallèles : car les objets que l'on regarde à travers ces lames ne paraissent point déplacés de leurs positions. Ce fait nous fournit un moyen très-simple de déterminer l'indice de réfraction pour un rayon lumineux qui passe d'un milieu dans un autre, quand on connaît les indices de réfraction de ces deux corps par rapport à l'air : en effet, en désignant par m et n les indices de réfraction des deux corps, nous aurons (fig. 741)

$$\sin a = m \sin a' = m \sin b, \text{ et } \sin c' = \sin a = n \sin c = n \sin b',$$

d'où
$$\frac{\sin b}{\sin b'} = \frac{n}{m}.$$

Ainsi, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un corps dans un autre, l'indice de réfraction est égal au rapport des indices de réfraction du deuxième et du premier milieu par rapport à l'air ; et, comme le parallélisme des rayons incidents et émergents s'observe également quand les deux lames sont placées dans le vide ou dans un milieu quelconque, il s'ensuit que, dans le passage de la lumière d'un corps dans un autre, l'indice est égal au rapport des indices du second et du premier corps par rapport au vide ou à un même milieu quelconque.

1256. Lorsqu'un rayon de lumière passe du vide dans un corps, et en général d'un corps dans un autre, indépendamment de la déviation qu'il éprouve par le fait de la réfraction, il se disperse dans une certaine étendue angulaire et se colore ; mais nous n'examinerons que plus tard ces phénomènes : dans ce qui précède, la loi doit être considérée comme étant relative au rayon qui occupe une position déterminée dans le faisceau réfracté.

1257. *Disposition des rayons réfractés dans un milieu indéfini, terminé par une surface quelconque.* Lorsque des rayons lumineux pénètrent du vide dans un milieu quelconque, ou d'un milieu dans un autre plus ou moins réfringent, les rayons réfractés, consécutifs dans de certaines directions, se coupent deux à deux, et les points d'intersection forment deux surfaces plus brillantes que les autres points de l'espace traversé par les rayons : ces surfaces, analogues à celles que forment les rayons réfléchis, portent aussi le nom de *caustiques*, et les points d'intersection de ces surfaces portent également le nom de *foyers*. Quelquefois ce sont seulement les

prolongements des rayons réfractés qui se rencontrent : alors les foyers sont *virtuels*.

Quand la surface est de révolution autour d'un axe passant par le point lumineux, les deux surfaces caustiques sont l'axe de révolution lui-même et une surface de révolution autour de cet axe. Ces caustiques pourraient se construire en traçant dans un même méridien un grand nombre de rayons réfractés et une courbe tangente à tous ces rayons; on pourrait même, dans le cas où la surface est sphérique, obtenir une équation analogue à celle du n° 1248 qui servirait à la tracer par points; mais nous nous bornerons à la détermination du foyer pour le cas des surfaces sphériques.

1258. Soit n l'indice de réfraction, P (fig. 742) le point lumineux, C le centre de la surface réfringente, PM un rayon incident s'écartant très-peu de l'axe PC, MP′ le rayon réfracté; posons $AC = r$, $AP = p$; $AP' = p'$, nous aurons entre les angles des triangles PMC et CMP′ les relations suivantes :

$$CPM = CMN - MCA, \quad CP'M = MCA - CMP', \quad \text{et } CMN = n.CMP';$$

d'où l'on tire $$CPM + nCP'M = (n-1)\,MCA.$$

Ces angles étant très-petits peuvent être considérés comme ayant pour tangentes AM, sous les rayons PA, P′A et AC, et être remplacés par leurs tangentes : remplaçant donc ces angles par leurs tangentes, et divisant par AM, il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r}.$$

En faisant p infini, on aura $$\frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r};$$

p' est ici la distance focale principale; en la désignant par a, l'équation primitive devient

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n}{a} \ldots\ (a).$$

La formule relative à une surface concave s'obtient en changeant dans cette équation les lignes de a et de p'; elle devient alors

$$\frac{n}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{n}{a} \ldots\ (b).$$

En faisant $r = \infty$, il vient

$$\frac{n}{p'} + \frac{1}{p} = 0 \ldots\ (c),$$

équation des foyers conjugués relatifs à une surface plane.

Si le point lumineux était dans le milieu le plus réfringent, il faudrait dans

toutes ces formules changer p en p', et réciproquement, ou considérer n comme étant l'indice du milieu le plus réfringent par rapport à l'autre.

1259. *Disposition des rayons lumineux à leur sortie d'un milieu réfringent, terminé par des surfaces planes.* Supposons d'abord que le milieu soit terminé par deux faces parallèles AB et CD (fig. 743), chaque rayon en pénétrant par la surface AB éprouvera une déviation; mais comme il se présentera pour sortir sur la surface CD sous un angle parfaitement égal à l'angle de réfraction sur AB, puisque AB est parallèle à CD, il sortira nécessairement sous un angle égal à l'angle d'incidence sur AB : ainsi les rayons incidents et les rayons émergents seront parallèles.

1260. Supposons maintenant que les deux surfaces qui terminent le corps réfringent soient deux surfaces planes inclinées AB et AC (fig. 744), et considérons d'abord les rayons incidents situés dans un plan perpendiculaire aux deux faces, c'est-à-dire dans la section principale du prisme. Le rayon incident ab, en se réfractant suivant bc, se rapproche de la perpendiculaire bm, et par conséquent s'éloigne du sommet A du prisme; et le rayon émergent cd, en s'éloignant de la normale cm', s'éloigne encore du sommet A : ainsi l'effet d'un milieu réfringent angulaire est d'éloigner le rayon émergent du sommet de l'angle. Il est facile de voir qu'il en serait de même si le rayon incident ab se trouvait au-dessus de la normale au point b (fig. 745).

Si l'on suppose (fig. 746) que la face AC du prisme tourne autour de l'arête qui passe par le point A, de manière à augmenter l'angle réfringent du prisme, l'incidence du rayon réfracté ab sur la face AC augmentera continuellement à mesure que l'angle A deviendra plus grand : il existera donc nécessairement une grandeur de cet angle, pour laquelle tous les rayons arrivés par AB, quelle que soit d'ailleurs leur incidence sur AB, se réfléchiront sur AC. L'angle du prisme cherché sera évidemment celui pour lequel un rayon incident Ba (fig. 747) émergerait suivant bC : car tout autre rayon incident donnerait un rayon réfracté qui rencontrerait AC sous un angle plus grand, et qui serait réfléchi intérieurement; et les rayons ne pourraient pas non plus émerger après avoir subi plusieurs réflexions, parce que les rayons réfléchis s'inclinent toujours davantage sur les surfaces du prisme, et par conséquent ne peuvent pas sortir. Or, dans ce cas, $\theta = \theta'$, égale l'angle limite, puisque ces deux angles correspondent à des angles d'incidence et d'émergence

droits; mais 2θ est le supplément de l'angle D, et A est également le supplément de l'angle D : donc $A = 2\theta$. Pour le verre ordinaire, $n = 31 : 20$, et $2\theta = 88° 37' 14''$.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que le rayon réfracté était dirigé vers la base du prisme; mais, s'il était dirigé vers le sommet, il se redresserait à chaque réflexion et finirait par émerger. Pour savoir quand cette circonstance aura lieu, considérons le prisme ABC (fig. 748); au point a menons la normale DaE et la perpendiculaire ab sur AC; il est évident que, pour qu'un rayon entré par a se réfléchisse sur AC du côté du point A, il faut que le rayon réfracté soit dirigé au-dessus de ab, et par conséquent qu'il fasse avec aE un angle plus grand que l'angle du prisme : ce qui n'est pas possible quand l'angle A est égal à l'angle limite, et à plus forte raison quand il est égal au double de cet angle.

Si l'angle A (fig. 749) était seulement égal à θ, tous les rayons incidents compris dans l'angle SaA seraient réfléchis sur la face AC; mais tous ceux qui seraient renfermés dans l'angle SaB émergeraient par AC. En effet, le rayon incident Sa perpendiculaire à AB donnera un rayon réfracté ab, qui fera avec la normale à la face AC un angle égal à l'angle A, c'est-à-dire égal à l'angle limite : alors le rayon émergent correspondant sera dirigé suivant bC. Si maintenant on suppose que le rayon s'incline vers le point A, les rayons réfractés correspondants feront avec la normale à AC des angles plus grands que θ et seront réfléchis, tandis que, si on suppose que le rayon s'incline vers le point B, les rayons réfractés correspondants feront avec la normale à AC des angles plus petits que θ, et sortiront du prisme.

Il est facile de voir que, si l'angle A était compris entre θ et 2θ, la réflexion sur AC commencerait à partir d'un rayon incident aS', d'autant plus rapproché de aB que l'angle A s'approcherait davantage de 2θ.

Si l'angle A était plus petit que θ, la réflexion sur AC s'arrêterait au rayon incident aS'', qui serait d'autant plus rapproché de aA que l'angle A serait plus petit, et ce rayon ne coïnciderait avec aA que quand l'angle A serait nul. En effet, le rayon Aa se réfracte au point a, suivant une droite ae faisant avec ab un angle égal à l'angle limite θ, et il se présente pour sortir en faisant avec la normale un angle $m = \theta + A$: car, l'angle acC extérieur au triangle cab étant égal à la somme des deux angles intérieurs opposés, on a

$90^\circ + m = 90^\circ + A + \theta$: le rayon Aa ne pourra donc sortir que quand on aura $A = 0$.

1261. Jusqu'ici nous avons supposé que le plan d'incidence était perpendiculaire aux deux faces du prisme; il nous reste à examiner quelles seraient les conditions d'émergence si ce plan avait une direction quelconque.

Soit ABC (fig. 750) la section principale du prisme qui passe par un point a quelconque de la surface d'incidence. Élevons la normale ab à cette surface, et décrivons autour de cette ligne comme axe un cône droit man, ayant pour angle au sommet le double de l'angle limite; ce cône renfermera tous les rayons réfractés qui pénètrent dans le prisme par le point a; de ce même point abaissons une perpendiculaire ac sur la face d'émergence AC, et décrivons de même autour de cette ligne un cône droit ayant un angle au sommet double de l'angle limite, ce cône renfermera évidemment tous les rayons réfractés correspondants au point d'incidence a qui pourront émerger : par conséquent, la partie commune des deux cônes renfermera tous les rayons qui pourront traverser le prisme. Mais l'angle formé par les axes des deux cônes est égal à l'angle du prisme : par conséquent, quand l'angle du prisme sera égal à 2θ, les cônes seront tangents; un seul rayon pourra traverser le prisme, et ce rayon sera évidemment celui qui est dirigé dans la section principale du prisme suivant Ba. Pour un angle plus grand du prisme, les deux cônes ne se pénétreront pas, et aucun rayon ne pourra traverser le prisme, quelle que soit d'ailleurs la direction du plan d'incidence. Si les cônes se pénètrent, il est facile de voir que les rayons incidents qui pourront traverser le prisme sont compris dans un cône qui coupe le plan AB, suivant deux arêtes situées dans les plans abr et abs du côté de aB, et dont l'arête la plus élevée correspond au rayon réfracté aq, lequel coïncide avec la normale quand l'angle du prisme est égal à θ, se rapproche de aA quand l'angle du prisme est plus petit que θ, de aB quand il est plus grand, et finit par coïncider avec aB quand cet angle est égal à 2θ.

1262. *Déviation que les prismes font éprouver aux rayons qui les traversent.* Soit ABC (fig. 751) la section principale d'un prisme, les rayons qui peuvent émerger et qui passent par le point m sont compris dans l'angle BmI, Im étant le rayon incident qui, prolongé par réfraction, rencontre la normale à la face AC sous un angle égal à l'angle limite.

La valeur de l'angle x peut s'obtenir de la manière suivante :

Dans le triangle mdk on a $r = \theta - a$; et, comme $\sin x = n \sin r$, il vient

$$\sin x = n \sin(\theta - a) = n(\sin\theta \cos a - \sin a \cos\theta) \ldots \quad (1)$$

mais $$\sin\theta = \frac{1}{n}, \quad \text{et } \cos\theta = \frac{1}{n}\sqrt{n^2 - 1};$$

ainsi, $$\sin x = \cos a - \sin a \sqrt{n^2 - 1}.$$

En faisant dans l'équation (1) $a = \theta$, $a = 2\theta$, on trouve $x = o$, et $x = -n \sin\theta = -1$, ce que nous savions déjà.

Supposons maintenant que le rayon incident Im tourne autour du point m en se rapprochant de mB, le rayon émergent, d'abord dirigé suivant dC, se relèvera constamment; et si par le point quelconque n on mène une ligne nE, formant avec la normale en ce point un angle égal à x, il est évident que toutes les lignes menées par le point n parallèles aux rayons émergents seront comprises dans l'angle CnE. Il suit de là, qu'à mesure que le rayon incident se rapproche de mB, le rayon émergent s'éloigne de nC : il y aura donc un rayon incident Lm dont le rayon émergent nP formera avec nC un angle PnC égal à LmB. On désigne sous le nom de *déviation* le plus petit des angles formés par les prolongements des rayons incidents et émergents. On voit d'après cela que les déviations des rayons incidents Im et Bm sont égales, car les rayons émergents correspondants sont nC et nE, et que de part et d'autre du rayon Lm, dont le rayon émergent sort sous un angle égal à l'angle d'incidence, il existe toujours des rayons incidents ayant même déviation. En effet, considérons un rayon incident L'm situé au-dessus de Lm, le rayon émergent correspondant nP' sera placé au-dessous de nP; menons un autre rayon incident L''m dont l'angle d'incidence soit égal à l'angle d'émergence du premier, il sera placé en dessous de Lm, le rayon émergent sera nP'', et la déviation des deux rayons sera la même. Ainsi, de part et d'autre de Lm, les rayons ont deux à deux la même déviation; la déviation de part et d'autre de Lm varie donc dans le même sens : donc la déviation correspondante à Lm est un maximum ou un minimum. Pour reconnaître lequel des deux, il suffit de voir si la déviation du rayon L'm très-voisin de Lm (fig. 752) est plus grande ou plus petite que celle de Lm. Pour cela, prolongeons les rayons Lm et Pn jusqu'à leur rencontre en k; D sera la déviation du rayon Lm; et si par le point k on mène les droites kl' et kp' parallèles aux rayons L'm et P'n, en désignant par D' la déviation du rayon L'm, on aura $D' = D + b - a$;

et suivant que a sera $>$ ou $<$ que b, D' sera $<$ ou $>$ que D. Or a est le decroissement de l'angle d'incidence correspondant au décroissement de l'angle de réfraction nmn', et b est l'accroissement de l'angle d'émergence correspondant à l'accroissement de l'angle de réfraction de $n' - n$; mais cet angle est évidemment égal à l'angle nmn'. Ainsi les angles a et b sont les variations des angles d'incidence correspondants à des variations égales, et en sens contraire de l'angle de réfraction; mais on sait que les angles varient plus rapidement que les sinus, et d'autant plus que les arcs sont plus grands. Par conséquent, si deux angles sont assujettis à avoir leurs sinus dans un rapport constant, le rapport du plus grand angle au plus petit croîtra à mesure qu'un des arcs deviendra plus grand : donc l'accroissement de l'angle d'incidence est plus grand que le décroissement pour la même variation de l'angle de réfraction; donc b est plus grand que a; par suite, D' est plus grand que D, et la déviation correspondante à un angle d'émergence égale à l'angle d'incidence est un minimum.

On peut facilement vérifier par l'expérience les résultats précédents. Si l'on dirige un rayon de lumière sur un prisme dont les arêtes sont horizontales, et qu'on le fasse tourner autour d'un axe horizontal de manière à faire varier les angles d'incidence, on voit, quand on tourne le prisme dans un sens quelconque, mais toujours le même, l'image changer de place, rester stationnaire et marcher ensuite en sens contraire; quand le sommet du prisme est en haut, l'image est stationnaire quand elle est au point le plus haut de sa course; et c'est le contraire quand le sommet est en bas. Lorsqu'on regarde un objet à travers un prisme, les mêmes effets ont lieu; mais l'image stationnaire est au point le plus bas quand le sommet du prisme est en haut, et au point le plus haut quand le sommet du prisme est en bas, parce que, dans ce cas, les rayons émergents qui sont les plus abaissés produisent l'image la plus élevée.

1263. *Lentilles.* On désigne sous le nom de lentilles des masses d'un corps diaphane terminées par des portions de sphères. On en connaît de deux espèces, les lentilles convergentes et les lentilles divergentes, ainsi désignées parce que les premières rapprochent les rayons qui les ont traversées, et que les dernières les éloignent. Les premières sont toujours plus épaisses au centre que vers les bords, les lentilles divergentes sont toujours au contraire plus minces au centre que vers les bords; la fig 733 présente toutes les formes de lentilles convergentes, et la fig. 734 toutes celles

des lentilles divergentes. Il est facile de reconnaître qu'elles jouissent de la propriété que nous avons énoncée. En effet, les surfaces courbes qui terminent les lentilles peuvent être considérées comme formées d'une infinité de petites surfaces planes, et les petites surfaces planes opposées comme appartenant à des prismes tronqués : or ces prismes ont leurs bases tournées sur l'axe de la lentille lorsqu'elle est plus épaisse au centre que vers les bords, et vers les bords dans le cas contraire; mais nous avons vu que, quand un rayon lumineux traversait un prisme, le rayon émergent se rapprochait de la base : donc les lentilles fig. 753 font converger les rayons, et les lentilles fig. 754 les rendent divergents.

1264. Lorsqu'un système quelconque de rayons traverse une lentille, les rayons émergents consécutifs dans certaines directions se coupent deux à deux, et forment des surfaces caustiques comme les rayons réfléchis sur les miroirs sphériques, et les sommets de ces caustiques sont encore désignés sous le nom de foyers; mais, comme en général on n'emploie jamais que des lentilles dont les faces ne sont qu'une très-petite fraction des surfaces sphériques auxquelles elles appartiennent, on peut considérer tous les rayons qui les traversent comme se réunissant sensiblement au foyer.

1265. *Détermination des foyers des lentilles.* Supposons d'abord les rayons incidents parallèles entre eux et à l'axe de figure de la lentille; soit XY (fig. 757) cet axe de figure, c'est-à-dire la ligne qui passe par les centres C et C′ des deux sphères qui la terminent; et LM un rayon incident infiniment voisin de l'axe : le rayon réfracté MN étant prolongé rencontrera l'axe en un point G, qui serait le foyer principal dans le cas où la substance de la lentille serait prolongée indéfiniment au delà de la surface d'incidence; mais le rayon réfracté MN éprouve une nouvelle déviation, et le point P′, où le rayon émergent vient rencontrer l'axe, est le foyer principal de la lentille.

En désignant par r et r' les rayons des deux sphères, on aura d'abord [1258]

$$AG = \frac{rn}{n-1}.$$

Mais on peut considérer les points P′ et G comme foyers conjugués par rapport à la surface sphérique A′, car, si le point P′ était lumineux, le rayon incident P′N se réfracterait suivant MN : on aura donc la relation

$$\frac{1}{P'A'} - \frac{n}{A'G} = \frac{n-1}{r'}.$$

En négligeant l'épaisseur de la lentille on aura

$$AG = A'G, \quad A'P' = AP' = a,$$

et les deux équations précédentes donneront

$$\frac{1}{a} = \frac{n-1}{r'} + \frac{n-1}{r}; \quad \text{d'où } a = \frac{rr'}{(n-1)(r+r')};$$

et, si $r = r'$,

$$a = \frac{r}{2(n-1)}.$$

Dans le cas que nous venons d'examiner, les deux sphères tournaient leur convexité en dehors; mais la formule conviendra à tous les cas en changeant le signe des rayons des sphères dont la concavité est dirigée vers le milieu environnant; ainsi, pour les lentilles biconcaves on aura

$$a = -\frac{rr'}{(r+r')(n-1)};$$

et, pour les lentilles concaves-convexes,

$$a = -\frac{rr'}{(r-r')(n-1)}.$$

Quand a est positif, le foyer est réel; il est virtuel dans le cas contraire. Il est facile de voir, d'après cela, que les lentilles dont l'épaisseur est plus grande au centre que vers les bords sont les seules qui aient un foyer réel.

Enfin il résulte de la forme même de la valeur de a que la distance focale est la même, quelle que soit la face par laquelle entrent les rayons.

Supposons maintenant que le point lumineux soit à une distance finie de la lentille, mais situé sur l'axe de figure; soit PM (fig. 758) un rayon incident très-voisin de l'axe, MN le rayon réfracté, NG le prolongement de ce rayon, et NP′ le rayon émergent : P et G pouvant être considérés comme foyers conjugués par rapport à la surface sphérique A, on aura, en désignant AP par p,

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{AG} = \frac{n-1}{r};$$

et, comme P′ et G sont aussi des foyers conjugués, on a, en désignant A′P′ par p',

$$\frac{1}{p'} - \frac{n}{A'G} = \frac{n-1}{r'}.$$

En posant AG = A′G, ce qui revient à négliger l'épaisseur de la lentille, et ajoutant ces deux équations, il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{n-1}{r} + \frac{n-1}{r'} = \frac{1}{a} \ldots\ (1).$$

a désignant la distance focale principale. Si la lentille était divergente, il faudrait changer le signe de p' et celui de a, et la formule deviendrait

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{a} \ldots\ (2).$$

Nous avons supposé dans ce qui précède que le point lumineux était placé

sur l'axe de figure de la lentille; il reste à examiner le cas où cette circonstance n'aurait pas lieu. Mais, avant, nous devons parler du centre optique.

On désigne sous ce nom un point de l'axe de figure d'une lentille qui jouit de cette propriété, que tout rayon qui passe par ce point émerge suivant une droite parallèle au rayon incident. La position de ce point est facile à déterminer.

Soit AB (fig. 759) une lentille biconvexe dont les deux faces ont leur centre en C et C′, et soit O le centre optique cherché; une ligne quelconque MN passant par le point O sera également inclinée sur les normales CM et C′N : car, si par les points M et N on menait deux plans tangents à la lentille, les rayons incidents et émergents auraient la même direction que s'ils avaient traversé une lame terminée par ces deux plans; mais, les rayons incidents et émergents étant parallèles, il en résulte nécessairement que les deux plans sont parallèles, et par conséquent que les angles CMO et C′NO sont égaux; alors les triangles COM et C′ON sont semblables, et on a

$$CO : C'O :: CM : C'N, \quad \text{ou } CM - CO : C'N - C'O :: CM : C'N,$$
$$\text{ou } OH : IO :: CH : C'I.$$

Ainsi le centre optique partage l'épaisseur de la lentille en deux parties proportionnelles aux rayons des faces auxquelles elles aboutissent : il résulte de là que, si les faces ont même courbure, le centre optique de la lentille est au milieu de son épaisseur, et que, si une des surfaces est plane, le centre optique coïncide avec le point où l'axe de figure rencontre la face courbe.

Il résulte de ce qui précède, qu'un rayon incident dont le rayon réfracté passe par le centre optique, n'éprouve point de déviation en sortant de la lentille; mais, si nous considérons d'autres rayons incidents voisins du premier, les rayons émergents correspondants seront déviés (fig. 760), et rencontreront le premier en un point qui sera le foyer. Pour en déterminer la position, soit P le point lumineux, et O le centre optique, xy l'axe optique, le rayon PO sortira sans déviation; soit PD un autre rayon parallèle à l'axe optique de la lentille, le rayon émergent correspondant coupera l'axe xy au point F, foyer principal de la lentille, et PO en un point P′, qui sera le foyer conjugué de P : or, en conservant les notations précédentes, et en considérant la figure PDFP′ comme un triangle, ce qui revient à négliger l'épaisseur de la lentille, on a

$$PP' : OP' :: PD : OF, \quad \text{ou } p + p' : p' :: p : a,$$

attendu que PD et PO ne diffèrent que d'une quantité de l'ordre de l'épaisseur de la lentille, que nous regardons comme assez petite pour être négligée. Cette dernière formule donne

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}.$$

Ainsi dans tous les cas la formule est la même; seulement, quand le point lumineux n'est pas sur l'axe de figure, l'axe optique est une ligne brisée qui passe par le centre optique : on lui donne le nom d'axe secondaire.

Ce résulat n'est cependant qu'une approximation bien grossière : aussi les conséquences qu'on en déduit ne sont pas confirmées par l'expérience. Il résulte du calcul que nous venons de faire, que le foyer principal est toujours à

la même distance de la lentille, quelle que soit la direction des rayons incidents par rapport à l'axe de la lentille; et il n'en est point ainsi : on trouve par expérience, que le foyer se rapproche de la lentille à mesure que les rayons incidents sont plus écartés de l'axe quand la lentille est biconvexe; et que le contraire a lieu quand la lentille est concave-convexe, convergente, et que les rayons incidents entrent par la surface concave.

Si le faisceau de lumière qui vient rencontrer la lentille était convergent au lieu d'être divergent, comme nous l'avons toujours supposé, il faudrait changer le signe de p dans la formule : dans ce cas le foyer devient virtuel quand il se trouve du côté de la lentille opposé à celui où se trouve le point de concours des rayons incidents. Il serait facile, d'après cela, de trouver le foyer relatif à un nombre quelconque de lentilles dont on connaîtrait les courbures et les positions. Dans tous les cas, les formules précédentes ne sont qu'approximatives, car dans toutes nous avons négligé l'épaisseur de la lentille. Les formules exactes s'obtiendraient facilement en faisant (fig. 757) $A'G = AG + c$: on obtiendrait alors des formules assez compliquées, et qui ne sont d'aucun usage. Lorsqu'on suppose la lentille terminée par une seule enveloppe sphérique pleine d'eau, pour laquelle $n = \frac{4}{3}$, on trouve, en ayant égard à l'épaisseur de la lentille, que la distance focale principale est égale au rayon de la sphère, résultat fort remarquable.

En discutant la formule générale qui lie les distances du point lumineux et du foyer à la lentille, on trouvera facilement pour ces deux points, les positions relatives que nous allons décrire. Supposons d'abord que la lentille soit convergente : si le point lumineux est à l'infini, le foyer conjugué se trouve derrière la lentille et au foyer principal; à mesure que le point lumineux s'approche, le foyer conjugué s'éloigne de la lentille, et se trouve à l'infini lorsque le point lumineux est arrivé à la distance du foyer principal; si le point lumineux continue à s'approcher, le foyer passe du même côté que le point lumineux : il est alors virtuel; à mesure que le point lumineux continue à s'approcher de la lentille, le foyer s'en approche aussi davantage, et, quand le premier a atteint la lentille, le second y est arrivé. Pour une lentille divergente, lorsque le point lumineux est situé à l'infini, le foyer principal est du même côté et, par conséquent, virtuel; à mesure que le point lumineux s'approche, le foyer se rapproche aussi de la lentille; lorsque le point lumineux est arrivé à la distance focale principale, le foyer, toujours virtuel, est à la moitié de cette distance; si le point lumineux continue à s'approcher, le foyer conjugué arrive sur la lentille en même temps que le point lumineux.

Il résulte aussi de la formule, que quand le point lumineux et le foyer sont à la même distance de la lentille, cette distance est

double de la distance focale principale : car si $p = p'$, on a $p = 2a$.

1266. Lorsqu'un corps lumineux est placé devant une lentille convergente, à une distance plus grande que la distance focale principale, chacun de ses points a un foyer particulier, et l'ensemble de tous ces foyers forme dans l'espace une image du corps lumineux : cette image est toujours renversée, parce que l'axe optique de chaque point sur lequel se trouve le foyer de ce point passe par le centre de la lentille. Ces images peuvent être rendues visibles en plaçant dans le lieu qu'elles occupent, un carton ou un verre dépoli. Il est facile de voir que quand $p = p'$, l'image focale a exactement les dimensions de l'objet. Cette circonstance fournit un moyen très-commode pour déterminer le foyer principal d'une lentille, en faisant varier la distance d'une lentille à un objet, jusqu'à ce que son image, sur un écran, ait les mêmes dimensions que l'objet.

1267. *Détermination des indices de réfraction.* La connaissance des indices de réfraction des corps diaphanes étant très-importante, nous allons décrire les méthodes qui ont été employées pour les déterminer, et nous donnerons le tableau des résultats obtenus. Mais d'abord nous ferons remarquer que, les pouvoirs réfringents de l'air et des gaz étant très-petits par rapport à ceux des corps solides et liquides, on peut sans erreur sensible prendre pour indice d'un de ces corps celui que l'on observe quand la lumière passe de l'air dans ce corps; et nous donnerons la définition de deux expressions qui se reproduiront souvent par la suite : on désigne sous le nom de *puissance réfractive* d'un corps le carré de l'indice de réfraction diminué de l'unité, et sous le nom de *pouvoir réfringent* la puissance réfractive divisée par la densité, ou la puissance réfractive sous l'unité de densité. Ces dénominations proviennent de ce que, dans le système de l'émission, la quantité $n^2 - 1$ représente l'action du corps sur la lumière.

La détermination des indices de réfraction peut se faire d'un grand nombre de manières différentes : la suivante, qui est due à Newton, est la plus simple et la plus précise. Supposons d'abord qu'il s'agisse d'une matière solide. On commence par former un prisme ABC (fig. 761) avec cette substance, et on le met dans une position fixe de manière que ses arêtes soient verticales; un cercle horizontal divisé, dont l'alidade est garnie d'une lunette renfermant un fil vertical est placé au point M; la lunette est dirigée sur une mire N, située à une grande distance, et l'on observe ensuite cette

même mire par réfraction à travers le prisme. En faisant tourner ce dernier jusqu'à ce que la déviation du rayon réfracté sur le rayon direct ou l'angle b soit le plus petit possible, les angles d'incidence et d'émergence u et u' seront égaux, ainsi que les angles de réfraction x et x'; et il est facile de reconnaître à l'inspection de la figure que, l'angle G étant à la fois le supplément des angles a et de $2x$, on a $x = \frac{a}{2}$, et que, l'angle b, qui représente la déviation parce que la mire est très-éloignée, étant un des angles extérieurs du triangle EkF, on a $b = 2(u - x) = 2\left(u - \frac{a}{2}\right)$; d'où $u = \frac{a+b}{2}$. Ainsi, en désignant par n l'indice cherché, on aura $n = \sin\frac{a+b}{2} : \sin\frac{a}{2}$.

Par cette méthode on évite la mesure des angles d'incidence et d'émergence, qu'il serait indispensable de connaître dans toute autre position du prisme.

1268. Quant à la mesure de l'angle réfringent du prisme, on peut y parvenir de bien des manières différentes. Nous nous contenterons d'exposer ici celles qui sont susceptibles de la plus grande exactitude. Soient BA et AC (fig. 762) les deux faces d'un prisme. En un point quelconque M on placera un cercle répétiteur, dont le plan soit perpendiculaire aux arêtes du prisme; on dirigera une des lunettes sur une mire O très-éloignée, et l'autre sur l'image de cette mire, vue par réflexion sur la face AB, suivant la direction MH; les rayons MO et HO pouvant être regardés comme parallèles, l'angle a mesuré par l'écartement des lunettes sera double de l'angle c : car a est le supplément de l'angle OHM, et ce dernier a aussi pour supplément les angles OHB et MHA, égaux entre eux. On transportera ensuite le cercle répétiteur en un point N, situé de l'autre côté, où l'on opérera de la même manière, c'est-à-dire que l'on mesurera l'angle b que forment les lunettes du cercle, dirigées l'une sur un signal O′ très-éloigné, l'autre sur l'image du signal vue par réflexion sur la face AC; l'angle b sera évidemment le double de l'angle c'. Enfin, d'un troisième point P, où l'on transportera le cercle, on dirigera les lunettes sur les deux mires O et O′, et on obtiendra l'angle d formé par les lignes PO et PO′. Or, si par le point P on mène deux droites parallèles aux faces du prisme, il est facile de voir qu'on aura

$$d = A + \frac{1}{2}a + \frac{1}{2}b; \quad \text{d'où } A = d - \frac{1}{2}(a + b).$$

Il serait beaucoup plus simple de se servir d'une seule mire très-éloignée, qu'on observerait directement, et par réflexion, sur les deux faces du prisme (fig. 763); il est facile de voir, à la seule inspection de la figure, qu'on aurait alors

$$A = \frac{a+b}{2}.$$

1269. Pour obtenir l'indice de réfraction des substances liquides, on emploie un procédé analogue. On les introduit dans des prismes formés d'une masse de verre (fig. 764) percée horizontalement d'un canal circulaire, et taillée en prisme sur les deux faces auxquelles il aboutit; on ferme ce canal par deux plaques de glace, à faces bien parallèles, qui sont pressées par des vis; la masse de verre est percée d'un autre petit canal *ab*, afin de pouvoir mettre et enlever les liquides sans déplacer les glaces.

De semblables prismes vides ne font évidemment éprouver aucune déviation au rayon lumineux : par conséquent, l'effet produit dans le cas où les lames sont partout d'égale épaisseur est entièrement dû au prisme liquide qui remplit le prisme creux; mais, comme il est très-difficile de se procurer des glaces dont les faces soient exactement parallèles, on commence par observer la déviation produite par le défaut de parallélisme, et on en corrige l'effet total.

Il existe plusieurs autres procédés pour déterminer les indices de réfraction des corps solides et liquides; nous en parlerons plus tard, lorsqu'il sera question du microscope, de la diffraction et de la polarisation. Mais il en est un facilement applicable aux corps solides et aux liquides que nous devons décrire ici.

1270. Soit ABC (fig. 765) un prisme rectangulaire en C, formé de la substance diaphane dont on veut déterminer l'indice, et placé sur un support horizontal RS, TU une tige garnie d'une coulisse portant un cercle divisé et une lunette. La lunette étant d'abord placée en un point élevé du support, on verra les rayons lumineux entrés par AC; mais à mesure qu'on l'abaissera, les rayons réfractés sur AC devenant plus obliques, il existera nécessairement une position où le point P cessera de laisser passer les rayons incidents entrés par AC, et où il réfléchira les rayons venus par AB. A cet instant, l'angle θ sera égal à l'angle limite : or, on peut facilement déduire θ de l'angle a, et du premier l'indice de réfraction, puisque son sinus est égal à $\frac{1}{n}$.

On a $\sin\theta = \cos c$, $\sin c = \frac{1}{n}\sin b$, $\sin b = \cos a$, et $\sin\theta = \frac{1}{n}$; d'où l'on déduit $n^2 = 1 + \cos^2 a$.

1271. Si au-dessous de la surface AC on place une goutte M d'un liquide ayant un pouvoir réfringent plus petit que la substance du prisme, on parviendra de la même manière à trouver la valeur de l'angle limite au moyen de l'angle a; et comme le sinus de cet angle limite est égal au rapport de l'indice de réfraction du liquide à celui de la substance du prisme, on en déduira facilement ce premier indice quand le second sera connu.

Dans ce cas, les relations précédentes subsistent, excepté la dernière, qui devient $\sin\theta = \frac{n'}{n}$: alors on trouve $n'^2 = n^2 - \cos^2 a$.

1272. Si, au lieu de placer en M un corps transparent, on y mettait un corps opaque, il existerait aussi un angle θ sous lequel les rayons émanés de ce corps cesseraient de pénétrer dans le prisme, et où le point P réfléchirait tous les rayons arrivés par AB. On peut alors, à l'aide de cet angle limite, déterminer l'indice de réfraction du corps solide; mais pour ces corps, lorsqu'on admet le système de l'émission, la formule n'est pas la même que pour les corps diaphanes. Nous reviendrons sur cette question quand nous parlerons du système de l'émission.

Il est important de remarquer que la méthode que nous venons d'indiquer suppose nécessairement l'angle c plus petit que l'angle limite θ : car, s'il n'en était pas ainsi, le rayon n'émergerait pas; et comme l'angle c est complément de l'angle θ, la méthode n'est applicable qu'autant que θ est plus grand que 45°. Elle n'est, par conséquent, pas applicable au verre ordinaire, pour lequel θ excède peu 42°; mais on peut, dans tous les cas, employer un prisme dont l'angle c soit aigu; la formule qui donne la valeur de l'indice est seulement un peu plus compliquée que quand l'angle est droit.

Soit ABC (fig. 766) un prisme de la substance dont on veut déterminer l'indice de réfraction, fixé sur l'alidade d'un cercle horizontal, de manière que le côté AC soit parallèle à l'axe de l'alidade, et que les arêtes soient verticales; MN une lunette horizontale fixe, renfermant deux fils croisés dans l'axe, et dont l'axe corresponde au diamètre du cercle qui passe par le zéro de la division. Tournons l'alidade jusqu'à ce que la réflexion devienne totale au point de croisement des fils : alors, en désignant cet angle par d, nous aurons

$$\sin\theta = \frac{1}{n}, \quad \sin b = n \sin a, \quad \theta = C + a, \quad \text{et } b = 90 - C - d,$$

relations d'où l'on déduit facilement

$$n^2 = \frac{\cos^2(C+d) + 1 - 2\cos C \cos(C+d)}{\sin^2 C}.$$

Nous décrirons plus loin un appareil imaginé par M. Babinet, au moyen duquel on détermine avec une grande facilité les indices de réfraction des corps solides et liquides.

1273. La détermination de l'indice de réfraction des gaz peut se faire par la première méthode que nous avons indiquée pour les liquides; mais l'appareil est beaucoup plus compliqué, attendu qu'il faut pouvoir faire le vide dans le prisme creux, y introduire le gaz sans que l'air puisse s'y mêler, et mesurer facilement la température et la pression. La fig. 767 représente l'appareil qui a été employé par MM. Biot et Arago dans un grand nombre d'expériences sur la réfraction des gaz. Il est composé d'un gros tube de verre coupé obliquement, et fermé par deux glaces faisant entre elles un angle très-grand; ce tube est percé supérieurement et inférieurement de deux ouvertures : la première communique avec une cloche très-longue, renfermant un baromètre à siphon, destiné à mesurer la force élastique du gaz; la seconde avec un tuyau garni d'un robinet que l'on peut mettre en communication, d'abord avec une machine pneumatique pour faire le vide dans le prisme creux, et ensuite avec un réservoir de gaz. En observant la déviation à travers le prisme vide, on obtiendra le rapport de réfraction pour un rayon qui passe du vide dans l'air; et, comme toutes les observations faites en introduisant différents gaz dans le prisme donnent seulement ce rapport pour le passage de l'air dans les gaz, le premier rapport fournira le moyen d'avoir celui du vide et de ces gaz.

Ces expériences exigent une grande précision dans la mesure de la déviation, attendu que, malgré le grand angle du prisme, elle est toujours très-petite, en général d'un petit nombre de minutes, et qu'une petite erreur sur la déviation en produirait une très-grande sur la valeur de l'indice. Nous ne pouvons pas entrer dans tous les détails qui seraient nécessaires; nous chercherons seulement à faire comprendre les principes sur lesquels repose la marche des opérations.

D'abord, malgré le grand angle du prisme, la déviation est trop petite pour que la lunette du cercle divisé puisse être amenée

successivement sur l'image directe et sur l'image réfractée, à cause de l'épaisseur du prisme. On pourrait à la vérité la pointer d'abord sur cette dernière, puis enlever le prisme, et la diriger sur la mire; mais on préfère faire tourner le prisme autour d'une ligne verticale, et lui faire décrire deux angles droits : alors, en amenant la lunette sur l'image réfractée par le prisme dans cette nouvelle position, l'angle de la lunette dans ces deux positions est évidemment double de la déviation cherchée. Alors on ramène le prisme dans sa première position ainsi que la lunette, mais en faisant tourner le limbe de l'instrument; on retourne de nouveau le prisme, et on fait marcher la lunette, le limbe étant fixe : l'arc décrit par la lunette est alors évidemment égal à quatre fois la déviation. En continuant ainsi, on mesurera un arc N, qui sera égal à $2n$ fois la déviation δ, et on aura $\delta = N : 2n$; les erreurs de lectures disparaissent quand n est très-grand, et les erreurs de pointage se compensent. Ces expériences donnent la déviation avec une très-grande précision. Mais cette déviation provient toujours de deux causes, du prisme gazeux et du défaut de parallélisme des surfaces des glaces qui forment le prisme; mais, comme les déviations dues à ces deux causes sont très-petites, l'effet total est égal à leur somme; et pour avoir la déviation due au prisme de gaz, il suffit de retrancher de la déviation totale celle que produit le prisme plein d'air.

1274. Dulong a déterminé les rapports des puissances réfractives des gaz par une méthode susceptible d'une grande précision, que nous allons rapporter. Le procédé en question repose sur une loi constatée par MM. Biot et Arago, et que Dulong a vérifiée sur plusieurs gaz. Cette loi consiste en ce que, pour un même fluide élastique, la puissance réfractive est exactement proportionnelle à sa densité : or, comme il est très-facile d'augmenter ou de diminuer la densité d'un gaz, on pourra toujours l'amener à un degré tel que son action sur la lumière soit la même que celle de l'air atmosphérique, par exemple; et si l'on détermine les densités du gaz et de l'air lorsque cette condition est remplie, il suffira d'une simple proportion pour déterminer le rapport des puissances réfractives quand les fluides posséderont la même force élastique; d'où l'on déduira ensuite facilement le rapport des indices. En effet, supposons qu'un prisme creux puisse être à volonté rempli de différents gaz sous différentes pressions, et que la déviation soit la même quand le prisme est rempli d'air sous la pression p, ou d'un autre gaz sous la pression p', la température étant la même : alors

l'indice de réfraction n' du gaz est égal à l'indice m de l'air; et en désignant par n l'indice du gaz sous la pression p, on aura, en vertu de la loi énoncée, $n^2 - 1 : n'^2 - 1 :: p : p'$, puisque les densités des gaz sont proportionnelles aux pressions quand la température est constante. Mais, comme $n' = m$, la proportion précédente donne $n^2 - 1 = p\ (m^2 - 1) : p'$. Dans cette formule, n et m sont les indices de réfraction du gaz et de l'air sous la pression p, et à une certaine température; mais, comme les quantités $n^2 - 1$ et $m^2 - 1$ varient proportionnellement à la densité, leur rapport est indépendant de la température et de la pression : ainsi la formule sera vraie pour la température 0° et pour la pression $0^m,76$; or, dans ces circonstances, on a trouvé $m = 1,000488$; par conséquent, on aura $n^2 - 1 = p\ (0,000488) : p'$.

L'appareil employé par Dulong se compose d'un prisme creux AB (fig. 768) formé d'un tube de verre épais, aux deux extrémités duquel sont ajustées deux glaces inclinées de 145° environ; la cavité du prisme communique par un tube de verre S avec un cylindre de même matière Z, d'un mètre de longueur et d'un diamètre de 5 centimètres. Ce cylindre porte à chacune de ses extrémités une douille en fer verni. Celle qui est adaptée à l'extrémité inférieure est munie d'un robinet en fer G; l'autre porte trois tubes en fer destinés à établir une communication, l'un N avec le prisme; le deuxième O avec une machine pneumatique J, par un tuyau de plomb qui s'y adapte; le troisième M avec une cloche à robinet R, placée sur une cuve à mercure. Le prisme est attaché solidement sur un support EF, et placé de manière qu'une mire éloignée puisse être aperçue au travers. Le cylindre de verre Z, assujetti dans une situation verticale, peut être rempli de mercure par un petit tube latéral I, un peu plus long que le cylindre, et communiquant avec lui par la partie inférieure.

Cette disposition permet, comme on le voit, de faire le vide dans le prisme, d'y introduire ensuite un gaz quelconque, pourvu qu'il n'attaque pas le mercure; de le dilater à volonté par l'écoulement d'une quantité convenable de mercure, et enfin de mesurer à chaque instant son élasticité. Dulong s'est presque toujours servi pour ce dernier objet du baromètre U, adapté à la machine pneumatique. Quand le gaz était de nature à corroder la pompe, le robinet P restait fermé; on le faisait sortir par le robinet supérieur C, en produisant un courant de gaz hydrogène ou d'acide carbonique sous la cloche R. Dans ce cas, l'élasticité se mesurait par la différence de niveau du mercure dans les tubes Z et I.

Il eût été facile de disposer l'appareil de manière à permettre la compression du gaz qu'il devait contenir; mais, comme il est assez difficile de s'opposer à la sortie d'un gaz comprimé, et que d'ailleurs la comparaison de deux gaz pouvait se faire avec autant de succès en dilatant celui qui possédait la plus grande puissance réfractive, ce dernier moyen a toujours été employé.

Pour constater l'égalité de puissance réfractive de deux gaz, il suffit de s'assurer que, sous la même incidence, la lumière éprouve la même déviation, quand elle traverse un espace successivement occupé par chacun de ces gaz, et terminé par deux plans d'une inclinaison constante; c'est à quoi l'on parvient à l'aide de la lunette astronomique X, munie de fils croisés au foyer de son objectif, et placée devant le prisme à une hauteur convenable, sur un pied susceptible de recevoir deux mouvements rectangulaires. Ce pied est solidement assujetti sur un massif de maçonnerie V dont les variations de hauteur, toujours extrêmement faibles et lentes par les changements de température, ne peuvent avoir d'influence. Le prisme étant ouvert, la lunette pointée sur la mire, on voit que, si les verres d'incidence et d'émergence avaient leurs faces extérieures et intérieures parallèles, il n'y aurait aucune déviation occasionnée par l'interposition du prisme; mais cette condition, qui serait impossible à satisfaire, n'est point nécessaire ici : les plans des plaques d'incidence et d'émergence peuvent même faire un angle quelconque, sans que les résultats des expériences en soient altérés.

Voici maintenant la manière d'opérer :

On commence d'abord par dessécher complétement toutes les surfaces intérieures de l'appareil, en y faisant passer un courant de gaz hydrogène sec; on y fait ensuite le vide, et on remplit le prisme d'air atmosphérique sec. Il existe pour cela un tube de verre T rempli de chlorure de calcium fondu, portant un robinet, et placé au-dessous de la platine de la machine pneumatique; on pointe alors la lunette sur la mire, à travers le prisme : l'appareil restant ouvert, l'élasticité de l'air est donnée par le baromètre. On fait une deuxième fois le vide, et, pour chasser les dernières portions d'air, on introduit une certaine quantité du gaz que l'on veut soumettre à l'observation; enfin on laisse écouler le gaz pur dans le prisme que l'on a vidé de nouveau, jusqu'à ce que la coïncidence de la mire avec le point de décussation des fils soit exactement rétablie. Si l'on a la précaution de faire écouler le gaz très-lentement, il est assez

acile de saisir le moment où cette coïncidence est exacte; ou bien, après en avoir introduit une quantité excédante, on ouvre le robinet inférieur G jusqu'à ce que le gaz dilaté ait précisément la densité convenable pour réfracter autant que l'air : alors on mesure la hauteur de la colonne de mercure dans le baromètre U adapté à la machine pneumatique, ou la différence de niveau du liquide dans les tubes Z et I; et en retranchant l'une ou l'autre de la pression de l'atmosphère au même moment, on a évidemment l'élasticité du gaz qui satisfait à la condition cherchée.

Pour le gaz hydrogène et le gaz oxygène, qui ont une puissance réfractive moindre que celle de l'air, au lieu de les comprimer pour leur faire acquérir une force de réfraction égale, il est préférable de suivre une marche inverse, c'est-à-dire de pointer la lunette lorsque le prisme est rempli de l'un de ces deux gaz sous la pression de l'atmosphère, et de dilater ensuite l'air jusqu'à ce que sa puissance réfractive soit réduite à celle du gaz.

Lorsque le gaz attaque le mercure, on modifie un peu la méthode d'observation. Le tuyau de communication du prisme avec le cylindre contenant le mercure est composé de trois parties (fig. 769). La pièce intermédiaire LK porte à sa partie supérieure une petite cuvette cylindrique qui laisse entre ses parois et le tuyau un espace annulaire; pareille disposition existe à l'extrémité supérieure du conduit N. Les diamètres de ces diverses parties sont combinés de telle façon que l'on peut enlever ou mettre cette pièce intermédiaire sans rien changer au reste de l'appareil.

Si l'on veut, par exemple, déterminer la puissance réfractive du chlore, on enlève le tuyau intermédiaire LK, et l'on ajuste à l'extrémité S un tube destiné à conduire hors du laboratoire l'excédant de gaz, qu'on introduit dans le prisme par l'orifice supérieur D. Lorsque la coïncidence de la mire avec les fils ne se dérange plus, ce qui indique que le gaz est pur, on fixe la lunette dans sa position; on chasse ensuite le chlore par un courant de gaz acide carbonique, puis on replace le tuyau LK, et l'on coule du mastic très-fusible dans les deux cuvettes L et K. Enfin, après avoir fermé l'orifice D par un petit bouchon de verre recouvert de cire molle, on fait le vide et l'on introduit dans le prisme un gaz dont la puissance réfractive est supérieure à celle du chlore, par exemple du cyanogène; on détermine ensuite les puissances réfractives du chlore et du cyanogène comme précédemment, et, la mesure de la puissance de ce dernier étant connue, on rapporte celle du chlore à l'unité

commune. Ce procédé exigeant un temps plus long, on ne doit le mettre en usage que dans les circonstances atmosphériques les plus favorables, c'est-à-dire vers le maximum de température du jour.

Il résulte des observations de MM. Biot et Arago, et de celles de Dulong :

1°. Que la puissance réfractive d'un gaz est exactement proportionnelle à sa densité : une variation de température de 8° à 32° n'altère point cette loi ;

2°. Les puissances réfractives des vapeurs suivent la même loi ;

3°. La puissance réfractive d'un mélange de gaz et de vapeurs est égale à la somme des puissances réfractives des gaz et des vapeurs mêlées ;

4°. La puissance réfractive d'un gaz composé n'a aucun rapport avec celles de ses éléments.

Les tableaux suivants renferment les puissances réfractives et les pouvoirs réfringents des principaux corps solides, liquides et gazeux.

Tableau des puissances réfractives et des pouvoirs réfringents de quelques corps solides et liquides.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES DE RÉFRACTION.	PUISSANCES RÉTRACTIVES $n^2 - 1$.	DENSITÉ δ.	POUVOIRS RÉFRINGENTS $\frac{n^2 - 1}{\delta}$
Sulfate de baryte.....	23 à 14	1,699	4,27	0,3979
Verre d'antimoine.....	17 à 9	2,568	5,28	0,4864
Chaux sulfatée.....	61 à 41	1,213	2,252	0,5386
Verre commun.....	31 à 20	1,4025	2,58	0,5436
Cristal de roche.....	25 à 16	1,445	2,65	0,5456
Chaux carbonatée.....	5 à 3	1,778	2,72	0,6536
Sel gemme.....	17 à 11	1,388	2,143	0,6477
Alun.....	35 à 24	1,1267	1,714	0,6570
Borax.....	22 à 15	1,1511	1,714	0,6716
Nitrate de potasse.....	32 à 21	1,345	1,9	0,7079
Sulfate de fer.....	303 à 200	1,295	1,715	0,7551
Acide sulfurique.....	10 à 7	1,041	1,7	0,6124
Eau de pluie.....	529 à 396	0,7845	1,0	0,7845
Gomme arabique.....	31 à 21	1,179	1,375	0,8574
Alcool rectifié.....	100 à 73	0,8765	0,866	1,0121
Camphre.....	3 à 2	1,25	0,996	1,2551
Huile d'olive.....	22 à 15	1,1511	0,913	1,2607
Huile de lin.....	40 à 27	1,1948	0,932	1,2819
Essence de térébenthine.	25 à 17	1,1626	0,874	1,3222
Ambre.....	14 à 9	1,42	1,04	1,3654
Diamant.....	100 à 41	4,949	3,4	1,4556

Tableau des indices de réfraction et des puissances réfractives des gaz à 0° et sous la pression de $0^m,76$.

NOMS DES GAZ.	INDICES DE RÉFRACTION n.	PUISSANCES RÉFRACTIVES $n^2 - 1$.	DENSITÉ δ.
Air atmosphérique	1,000294	0,000589	1,000
Oxygène	1,000272	0,000544	1,103
Hydrogène	1,000138	0,000277	0,068
Azote	1,000300	0,000601	0,976
Ammoniaque	1,000385	0,000771	0,591
Acide carbonique	1,000449	1,000899	1,524
Chlore	1,000772	0,001545	2,476
Acide hydrochlorique	1,000449	0,000899	1,254
Oxyde d'azote	1,000503	0,001007	1,527
Gaz nitreux	1,000303	0,000606	1,039
Oxyde de carbone	1,000340	0,000681	1,992
Cyanogène	1,000834	0,001668	1,818
Gaz oléfiant	1,001678	0,001356	0,980
Gaz des marais	1,000443	0,000886	0,559
Éther hydrochlorique	1,001095	0,002191	2,234
Acide hydrocyanique	1,001451	0,000903	0,944
Gaz oxychlorocarbonique	1,000159	0,002318	3,442
Acide sulfureux	1,000665	0,001331	2,247
Hydrogène sulfuré	1,000664	0,001288	1,178
Éther sulfurique	1,00153	0,003061	2,580
Soufre carburé	1,01500	0,003010	2,644
Hydrogène protophosphoré	1,000389	0,001579	1,256

Décomposition de la lumière par réfraction.

1275. Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la lumière n'éprouvait dans la réfraction aucune autre altération que sa déviation; mais il n'en est pas ainsi : un rayon de lumière blanche qui traverse un prisme en sort dilaté et coloré. Ce phénomène porte le nom de *dispersion ;* nous verrons bientôt à quoi il faut l'attribuer. Le faisceau réfracté est en général d'autant plus dispersé que la puissance réfractive de la substance est plus considérable : pour les gaz, la dispersion est peu sensible; mais, pour les substances solides ou liquides, les rayons colorés sont très-écartés. Dans les tables précédentes, les indices sont relatifs au rayon jaune qui occupe le milieu du faisceau.

Pour reconnaître la dispersion et la coloration qui accompagnent

toujours la réfraction, lorsque la surface d'émergence n'est point parallèle à la surface d'incidence, imaginons qu'on ait pratiqué au volet d'une chambre obscure une ouverture d'un très-petit diamètre, par laquelle s'introduise un faisceau délié de rayons solaires. Si l'on reçoit le faisceau sur un prisme de verre blanc bien transparent, et le faisceau réfracté sur un carton blanc, on observe 1° que l'image (fig. 770), nommée *spectre*, est allongée perpendiculairement aux arêtes parallèles du prisme; 2° qu'elle est terminée par deux lignes droites parallèles et par deux demi-cercles; 3° que toute la surface de l'image est formée de bandes parallèles entre elles et aux arêtes des prismes, et colorées des teintes les plus brillantes. L'extrémité la plus voisine de l'angle réfringent du prisme est d'un rouge vif; l'extrémité opposée est violette.

Dans ces expériences, il faut employer un appareil qui dirige sur l'ouverture du volet de la chambre noire un rayon solaire ayant toujours la même direction; on peut se servir, pour cela, d'un héliostat, appareil que nous décrirons bientôt; mais il suffit presque toujours d'employer un porte-lumière : c'est un appareil qu'on fixe dans le volet de la chambre, et qui renferme un miroir qui peut prendre deux mouvements perpendiculaires à l'aide de deux vis de rappel que l'on fait mouvoir de l'intérieur de la chambre; on peut alors le placer et le maintenir dans la position convenable pour que le rayon qui pénètre dans la chambre ait constamment à peu près la même direction.

Les fig. 1018 et 1019 représentent un porte-lumière construit par M. Soleil; la première est une coupe perpendiculaire à la plaque fixée au volet; la seconde l'élévation de cette plaque. A, miroir en glace étamée, fixé dans un cadre de cuivre mobile autour d'un axe qui traverse deux montants parallèles B, et dont on fait varier l'inclinaison au moyen de la roue dentée C, qui termine la tige D. Les supports de l'axe du miroir sont fixés par leur base sur une plaque circulaire dentée qui peut tourner autour de son centre contre la plaque E et dont le mouvement s'effectue au moyen du pignon F. La tige D traverse librement la plaque E.

Si l'on observe des spectres formés par des prismes de différentes substances incolores, de même angle et dans la même position, on reconnaît que les couleurs se succèdent toujours dans le même ordre, mais qu'elles n'occupent pas dans le spectre des espaces proportionnels. Ainsi, par exemple, un prisme de flint-glass (verre renfermant du plomb) donne proportionnellement beaucoup plus de

violet et beaucoup moins de rouge qu'un prisme de crown-glass (verre ordinaire).

Le nombre des teintes intermédiaires entre le rouge et le violet qui forment les extrémités des spectres est infini; mais on est convenu d'en prendre quelques-unes pour termes de comparaison. Ces teintes se succèdent dans l'ordre suivant : *rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet.* Dans l'image solaire, ces couleurs passent de l'une à l'autre d'une manière continue par une infinité de nuances intermédiaires. On peut obtenir un spectre dans lequel les teintes sont assez bien séparées en faisant entrer les rayons solaires par un orifice d'un centimètre de diamètre, recevant le faisceau sur un prisme d'un angle réfringent de 60°, et plaçant l'écran à six mètres de distance.

Toutes les lumières artificielles que nous pouvons produire donnent des spectres analogues à celui qui est produit par les rayons solaires; mais les couleurs sont moins vives, et dans toutes il manque certaines couleurs; cependant, celles qui s'y trouvent sont disposées dans le même ordre que dans le spectre solaire.

1276. Les observations que nous avons faites sur le spectre solaire s'expliquent très-bien en supposant que les rayons de lumière blanche soient formés de rayons parallèles, jouissant individuellement de la propriété de produire la sensation d'une couleur déterminée, et ensemble de celle de produire la sensation de la lumière blanche; et qui, ayant des réfrangibilités différentes, sont séparés par tous les corps diaphanes dont les faces d'incidence et d'émergence ne sont point parallèles. Mais, pour que cette hypothèse puisse être admise, il faut reconnaître : 1° que l'allongement du spectre solaire ne peut pas être produit par la dispersion de rayons également réfrangibles; 2° que les rayons colorés ont invidiuellement des réfrangibilités différentes; et 3° enfin, que la réunion des rayons colorés produit réellement de la lumière blanche.

1277. Pour reconnaître l'altération qu'éprouve dans ses dimensions un faisceau de lumière homogène, c'est-à-dire dont tous les rayons sont également réfrangibles lorsqu'il traverse un prisme, considérons (fig. 771) un prisme dont les arêtes sont horizontales, et un faisceau de lumière partant d'un point *o*, et formant un cône droit dont l'axe est dans un plan perpendiculaire aux arêtes du prisme. Je dis d'abord que les rayons incidents et émergents correspondants sont également inclinés sur un plan perpendiculaire aux arêtes du prisme : en effet, nous verrons plus tard que la vitesse de la lumière est toujours la même dans le même milieu; et, comme les composantes de la vi-

tesse du rayon incident et du rayon émergent, parallèlement aux arêtes du prisme, sont nécessairement égales, attendu que le prisme est symétrique par rapport à cette direction, et qu'il n'y a pas de raison pour que ces composantes soient altérées plutôt dans un sens que dans l'autre, il s'ensuit nécessairement que le rayon incident et le rayon émergent sont également inclinés sur la section principale. On conçoit d'ailleurs facilement qu'un prisme ne produit pas de déviation parallèlement à ses arêtes; ce que l'on peut vérifier par l'expérience : car, lorsqu'on regarde un corps à travers un prisme, les dimensions du corps parallèles aux arêtes n'éprouvent point d'altération, qu'elle que soit la position du prisme. Ainsi, les rayons incidents dirigés dans le méridien parallèle aux arêtes du prisme donneront deux rayons émergents qui feront entre eux un angle égal à l'angle du cône incident. Voyons maintenant ce qui arrivera aux rayons incidents dirigés suivant la section principale du prisme : on a évidemment $o = i - i'$, et $k = r' - r$, et on aura $o = k$ quand on aura en même temps $i = r'$ et $i' = r$, ce qui pourra toujours avoir lieu quand le cône incident contiendra le rayon de minimum déviation qui passe par le point o, rayon qui, lorsque l'angle o est très-petit, coïncide sensiblement avec son axe. Il résulte de là que, si l'axe du faisceau incident a la direction du rayon de minimum déviation, et si on reçoit le faisceau émergent sur un écran, les rayons qui formeront les extrémités du diamètre horizontal seront inclinés entre eux de la même quantité que ceux qui forment les extrémités du diamètre vertical, et cet angle sera égal à l'angle au sommet du cône incident; et par conséquent, si les points de rencontre des rayons qui forment les extrémités des deux diamètres étaient à la même distance de l'écran, les deux diamètres seraient égaux. Il n'en est point ainsi, à cause de l'inégalité de divergence des rayons dans l'intérieur du prisme parallèlement et perpendiculairement à la section principale; mais les distances des points de rencontre étant peu différentes, il n'en résultera qu'une petite différence dans les diamètres, différence qui sera une fraction d'autant plus petite du diamètre moyen que l'écran sera plus éloigné : ainsi, en recevant l'image sur un écran placé à une grande distance du prisme, l'image sera sensiblement circulaire. Mais, si le faisceau incident n'avait pas sur la surface du prisme l'inclinaison que nous avons supposée, le diamètre horizontal de l'image serait le même, et le diamètre vertical serait plus grand ou plus petit, suivant le sens dans lequel l'inclinaison du faisceau incident aurait varié. En effet, soit pkp' (fig. 772) le faisceau émergent correspondant à la position o' du faisceau incident, qk' et $q'k'$ des lignes parallèles aux rayons émergents correspondants à la position o'' du faisceau incident, on a $D - D' = k$, et $k' = D - a - (D' - a') = k + a' - a$: ainsi le diamètre vertical de la seconde image sera plus grand que celui de la première, si a' est plus grand que a, et il sera plus petit dans le cas contraire; mais a est la variation de déviation qu'éprouve le rayon incident supérieur lorsque le faisceau incident passe de la position o' à la position o'', et a' est la variation de déviation du rayon inférieur; or, les angles o' et o'' étant les mêmes, le rayon supérieur et le rayon inférieur du faisceau incident éprouvent la même variation d'incidence quand le faisceau passe de o' en o'' : par conséquent a et a' sont les variations de déviations correspondantes à des variations égales d'incidence; mais, à par-

tir du minimum de déviation, les accroissements de déviation pour des accroissements ou des décroissements égaux de l'angle d'incidence vont en augmentant, par conséquent a sera plus grand que a' si le rayon supérieur est plus écarté de la direction de minimum de déviation que le rayon inférieur, et ce sera le contraire s'il l'est moins. Or, il est facile de voir que, quand le faisceau se rapproche du sommet du prisme, les rayons inférieurs sont plus écartés de la direction de la déviation minimum que les rayons supérieurs : par conséquent a' est plus petit que a, et c'est le contraire quand le point o se rapproche de la base du prisme; ainsi, dans le premier cas le diamètre vertical de l'image s'allonge, et dans le second il se raccourcit.

Si les rayons du faisceau réfracté marchaient en sens contraire, les rayons sortiraient du prisme dans la direction des rayons incidents : ainsi l'œil, étant placé au point de convergence des rayons, verrait une image circulaire; mais si le faisceau incident avait une section circulaire dans la position où il devrait être aplati pour paraître circulaire, l'image serait évidemment allongée, et elle serait aplatie quand le faisceau, pour donner une image circulaire, devrait être allongé. Ces dernières conséquences de la théorie peuvent facilement être vérifiées par l'expérience : si on regarde un corps sphérique placé à une petite distance du prisme, dans la position de minimum de déviation, l'image est sensiblement circulaire; mais, si l'on tourne le prisme de manière à rapprocher de l'œil l'angle réfringent du prisme, l'image s'aplatit, et, en le tournant en sens contraire, l'image s'allonge. Il résulte évidemment de ce que nous venons de dire, que l'allongement du spectre solaire dans la position du minimum de déviation est incompatible avec l'égale réfrangibilité des rayons.

1278. Pour constater l'inégale réfrangibilité des rayons, recevons le spectre sur un carton percé d'un trou correspondant au centre d'une certaine bande colorée (fig. 773); le faisceau de rayons qui passera au travers sera isolé du reste des rayons et pourra être examiné séparément. En lui faisant traverser un second prisme EFD, on remarque que sa teinte reste constante; et, si en traversant ce second prisme, l'incidence est égale à l'émergence, son image directe est égale à son image réfractée, ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que l'indice de réfraction est le même pour tous les rayons qui le composent. En recevant ces rayons sur une lentille, ils se réunissent en un seul foyer : d'où l'on doit conclure encore que tous sont également réfrangibles. Si l'on pratique sur le carton MN qui reçoit le spectre une seconde ouverture correspondant au centre d'une autre bande colorée, le nouveau rayon, en passant à travers ce second prisme, se comportera comme le premier; mais, en examinant la position des deux images après la seconde réfraction, on reconnaît facilement que les rayons qui les ont produites ont des réfrangibilités différentes, car la distance

des images est plus grande que celle qui résulterait de leur égale réfrangibilité.

L'expérience peut être faite d'une manière plus concluante et plus facile à exécuter. Si l'on reçoit le faisceau de lumière sur un prisme dont les arêtes soient horizontales, on obtiendra un spectre MN (fig. 773 A) allongé verticalement, et dans lequel le rouge occupera la partie supérieure, si l'angle réfringent du prisme est placé en haut : si alors on place derrière ce prisme un autre prisme dont les arêtes soient verticales, tous les rayons seront déviés horizontalement, et l'on obtiendrait un spectre parallèle au premier si tous les rayons étaient également réfrangibles ; mais il se forme un spectre M'N' incliné dans le sens indiqué par la figure, ce qui démontre évidemment que la réfrangibilité des rayons croît depuis le rouge jusqu'au violet.

On peut vérifier ces inégalités de réfrangibilité en traçant sur un carton noir et sur la même ligne des bandes de même hauteur et de différentes couleurs : en les regardant à travers un prisme, on les voit inégalement élevées.

Enfin, nous avons vu [1254] que, quand un rayon de lumière tendait à sortir d'un milieu réfringent pour passer dans le vide ou dans un corps moins réfringent, le rayon se réfléchissait complétement quand le sinus de l'angle d'incidence dépassait $\frac{1}{n}$; or, si les rayons colorés sont inégalement réfrangibles, les angles sous lesquels la réflexion totale commencera seront différents pour chacun d'eux : par exemple, le rayon violet, étant le plus réfrangible, commencera à se réfléchir sous un plus petit angle que le rayon rouge. Newton a vérifié ce fait par l'expérience suivante : il fit tomber un trait de lumière solaire dans une chambre obscure, perpendiculairement à la face AC (fig. 774) d'un prisme BAC, dont les angles B et C étaient de 45° ; le rayon arrivé en I se divisa en deux parties : l'une fut réfléchie et sortit par la face AB sans éprouver de dispersion sensible, tandis que l'autre partie fut réfractée au point I et forma sur un carton le spectre *mn*. Le rayon réfléchi fut reçu après son émergence sur le prisme *abc*, et forma un autre spectre *m'n'*; alors, en faisant tourner le prisme ABC de manière à augmenter l'angle d'incidence sur la face BC, il remarqua que la partie violette diminuait dans le spectre *mn* et augmentait dans le spectre *m'n'*, et que toutes les couleurs s'affaiblissaient successivement dans le spectre *mn* et se renforçaient dans le spectre *m'n'*, suivant l'ordre violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé,

rouge; ce qui s'accorde parfaitement avec ce que nous avons annoncé.

Ainsi, chaque rayon coloré conserve sa teinte par la réfraction, sa réfrangibilité est constante pour le même corps, et dans les mêmes circonstances les réfrangibilités des rayons différents sont inégales; et, comme dans les spectres formés par toutes les substances transparentes, la succession des teintes est la même, il en résulte que le rayon violet est le plus réfrangible, le rayon rouge celui qui l'est moins, et qu'entre ces deux limites la réfrangibilité des rayons varie d'une manière continue. Mais les rapports des réfrangibilités des différents rayons ne sont pas les mêmes pour tous les corps, comme nous le verrons lorsqu'il sera question de l'achromatisme.

1279. Reste enfin à reconnaître si la réunion de tous les rayons séparés par un prisme peut produire de la lumière blanche. Pour cela recevons le spectre sur une lentille : chaque système de rayons ayant une réfrangibilité différente formera un foyer séparé, et il y aura, par conséquent, sur l'axe de la lentille une suite de foyers distincts, mais qui seront peu éloignés les uns des autres, car les réfrangibilités diffèrent peu. Si l'on place dans le lieu des foyers un miroir métallique oblique à l'axe, il réfléchira régulièrement les rayons appartenant à chaque cône réfracté, et il paraîtra coloré d'une teinte qui variera avec la position de l'œil; mais si on y place un carton, une feuille de papier ou un corps non poli, la réflexion diffuse des rayons les mêlera, et on n'apercevra qu'une image blanche légèrement colorée sur ses bords. Pour rendre encore plus évident que c'est bien la sensation simultanée de tous les rayons qui produit la lumière blanche, on prend un carton découpé (fig. 775) que l'on fait mouvoir devant le spectre solaire de manière à intercepter successivement différentes bandes colorées : alors l'écran placé au foyer de la lentille prend différentes nuances qui dépendent de celles des rayons interceptés; mais si on fait mouvoir rapidement le carton, l'image du foyer devient blanche. Ici les sensations des différentes couleurs sont réellement successives; mais, comme la sensation dans l'organe a une certaine durée, cette dernière étant plus grande que le temps total de leur succession, l'effet produit est le même que si elles étaient simultanées.

On peut encore reformer la lumière blanche en rendant les rayons colorés parallèles : il suffit pour cela de regarder le spectre (fig. 776)

avec un prisme de même matière, d'un angle réfringent égal et placé d'une manière symétrique; les rayons, se trouvant dans des circonstances inverses de celles qui les ont séparés, redeviendront parallèles et produiront de la lumière blanche; c'est ce qu'on observe en effet. La recomposition de la lumière blanche par des réfractions égales et opposées n'exige pas que les deux prismes aient des angles parfaitement égaux : on peut parvenir à ramener les rayons au parallélisme, quel que soit le prisme dont on fait usage, pourvu qu'il ne soit pas extrêmement différent du premier, et on peut toujours trouver une infinité de positions telles qu'il recompose la lumière réfléchie par le spectre. En effet, si on place le prisme de manière qu'il soit en sens contraire du premier, à une petite distance du tableau, les rayons émanés du spectre, et qui arriveront à l'œil, formeront une image du spectre moins allongée, parce que la réfraction inclinera les rayons émergents vers la base du prisme, et que cette déviation sera plus grande pour les rayons violets que pour les rayons rouges; à une certaine distance l'image deviendra parfaitement blanche, et cela arrivera quand la dispersion dans le prisme pour des rayons parallèles sera égale à la convergence des rayons incidents; au delà de cette distance on verrait un spectre en sens contraire. On se rendra compte d'une manière plus simple du fait dont il est question en remarquant que, si le second prisme était assez éloigné du spectre pour que les rayons qui en émanent pour arriver à l'œil à travers le prisme pussent être considérés comme parallèles, l'œil verrait un spectre opposé à celui que forme le premier prisme, et que, si on rapproche le prisme, les rayons étant convergents, l'étendue du spectre primitif sera seulement diminuée : à une certaine distance il devra donc disparaître.

Il est facile de déduire de ce qui précède que, quand un faisceau de lumière blanche ou colorée traverse un corps diaphane terminé par des faces parallèles, la lumière éprouve une décomposition en pénétrant dans le corps et une recomposition en sortant.

1280. *Condition pour former un spectre dont les teintes soient homogènes.* Pour que les différentes bandes colorées obtenues par la décomposition de la lumière à travers un prisme soient homogènes, il y a plusieurs précautions à prendre, que nous allons successivement examiner.

1°. Le rayon de lumière doit avoir de très-petites dimensions, et l'écran doit être placé à une grande distance. En effet, considérons

un faisceau de rayons parallèles AB*ab* (fig. 777) : les rayons extrêmes AB et *ab* donneront les faisceaux divergents CDGH et *cdgh*, dans lesquels les rayons de même couleur seront parallèles; le rayon rouge DH coupera le rayon violet *cg* en un point F. Si maintenant nous imaginons que le faisceau coloré CGDH se meuve parallèlement à lui-même jusqu'à ce qu'il vienne coïncider avec le faisceau *cgdh*, il est évident que, par un point quelconque de l'espace DF*c*, il passera successivement un rayon de toutes les couleurs : or, comme toutes les positions que nous avons supposé que prenait successivement le faisceau sont occupées simultanément par des faisceaux émergents dans l'espace *c*D, il s'ensuit que par tous les points de l'espace DF*c* il passe un rayon de toutes les couleurs, et par conséquent que cet espace est blanc. Ainsi, si on place un écran en avant du point F, par exemple dans la position B*l*, on aura deux spectres BL et *kl*, séparés par une bande blanche L*k*; mais, si l'écran est placé au delà du point F, on n'obtiendra qu'un seul spectre G*h*, qui sera d'autant plus étendu et dans lequel les bandes colorées seront d'autant plus homogènes que l'écran sera plus éloigné du prisme. L'accroissement des dimensions du spectre à mesure que l'écran s'éloigne est évident; quant à la séparation des bandes colorées dans les mêmes circonstances, il suffit de remarquer que chaque bande colorée occupe toujours la même étendue sur l'écran, quelle que soit sa position : par exemple, les rayons violets sont tous renfermés entre CG et *cg*, et tous les rayons rouges entre DH et *dh* : par conséquent, ces bandes seront d'autant plus espacées que l'écran sera plus éloigné. Le même effet peut être obtenu sur un écran placé à une distance constante du prisme en diminuant l'étendue du faisceau incident : en effet, chaque spectre d'une même teinte varie proportionnellement au diamètre du faisceau incident, et l'étendue totale du spectre entier diminue dans un plus petit rapport, car il est toujours égal au diamètre d'un des spectres élémentaires, augmenté d'une quantité constante, égale à la dispersion d'un pinceau très-délié. Par exemple, si le faisceau AB*ab* prenait un diamètre deux fois plus petit, le faisceau réfracté serait CGM*x*; le spectre qui était primitivement G*h* se trouverait réduit à G*x*, plus grand que 1/2 G*h*, et chaque spectre élémentaire d'une seule teinte aurait pour largeur G*t*, égal à la moitié de G*g*, largeur des mêmes spectres quand le faisceau incident était double.

2°. Le corps éclairant doit avoir un très-petit diamètre apparent. En effet, soient P (fig. 778) le soleil, MN un écran percé d'un très-

petit orifice O, et ABC un prisme que nous supposerons incliné de manière à produire le minimum de déviation : en ne considérant que les rayons violets du soleil, le spectre qu'ils formeront sera un cercle vv', les rayons rouges formeront un autre spectre circulaire rr', et les spectres de toutes les autres teintes seront des cercles compris entre ceux-là, et empièteront plus ou moins sur chacun d'eux, comme on le voit fig. 779. Si nous supposons que le diamètre apparent du soleil diminue, le centre de chaque spectre élémentaire ne changera pas, parce qu'il est le lieu du rayon émergent correspondant au rayon incident passant par le centre du soleil; mais le diamètre de chacun d'eux diminuera, ils se recouvriront moins et, par conséquent, chaque teinte sera plus homogène. En désignant par l la longueur du spectre dans la position du prisme qui donne le minimum de déviation, et par r le rayon des cercles de différentes teintes, en supposant les centres également espacés, le nombre des cercles qui passent par un même point est égal au nombre des centres qui se trouvent à une distance plus petite que r de chaque côté de ce point; et ce nombre est évidemment proportionnel à $\frac{2r}{l-2r}$, puisque tous les centres sont distribués sur la longueur $l - 2r$. Ainsi, en un point quelconque placé à une distance plus grande que $2r$ des extrémités du spectre, le mélange des couleurs est au mélange des rayons dans la lumière blanche comme $2r : l - 2r$. Cette relation exige nécessairement que $l - 2r$ soit plus grand que $2r$, ce qui a toujours lieu.

En outre, quand le corps éclairant a des dimensions appréciables, chaque image colorée est environnée d'une pénombre d'autant plus large que le diamètre apparent du corps est plus grand, et la superposition de ces pénombres rend très-vague les contours du spectre. Ainsi, sous tous les rapports, il est important de ne faire arriver sur le prisme qu'un faisceau très-délié de lumière formé de rayons sensiblement parallèles.

On peut parvenir de plusieurs manières différentes à diminuer la divergence des rayons incidents du soleil : on pourrait d'abord recevoir un faisceau à travers une très-petite ouverture A (fig. 780), et recevoir le cône de rayons divergents sur un autre écran percé d'une très-petite ouverture B, pour ne laisser passer qu'une partie de l'image du soleil. La divergence de ces rayons sera évidemment plus petite que celle des rayons qui passent par l'orifice A, dans le rapport du diamètre de l'image du soleil sur l'écran PQ au diamètre

de l'orifice. On pourrait substituer au soleil son image formée au foyer d'une lentille convexe d'un court foyer; cette image aurait un très-petit diamètre relativement à celle du soleil, et on placerait derrière la lentille un écran percé d'un très-petit trou destiné à ne transmettre au prisme qu'un faisceau très-délié des rayons émanés du foyer. Mais il est facile de voir que par ce dernier moyen on ne gagnerait rien en intensité : car la divergence des rayons au delà du foyer augmente proportionnellement à la concentration de ces rayons au foyer, et serait exactement la même que si les rayons traversaient directement un premier orifice d'un diamètre égal à celui de l'image focale. Ainsi le premier moyen, étant le plus simple, doit toujours être employé de préférence; il est même avantageux de recevoir sur le prisme un faisceau qui a traversé une fente étroite parallèle aux arêtes du prisme : le spectre est plus large, et les teintes sont aussi séparées que s'il était plus étroit. On peut d'ailleurs, dans tous les cas, espacer davantage les teintes en recevant le spectre sur des écrans inclinés sur le faisceau émergent. Pour obtenir un spectre très-lumineux on pourrait placer dans le volet une lentille cylindrique d'un très-long foyer, le prisme dans le faisceau émergent et l'écran au foyer : le spectre serait très-étroit, les teintes très-brillantes et bien séparées.

3°. Enfin une dernière cause, et certainement une des plus influentes du mélange des couleurs du spectre solaire, réside dans les veines et les stries du prisme, qui dispersent irrégulièrement la lumière. Quand on n'a pas de prisme d'une pureté suffisante, on peut employer des prismes creux en glaces, remplis d'un liquide très-dispersif, par exemple le sulfure de carbone.

1281. *Explication de différents phénomènes.* La recomposition de la lumière par le parallélisme des rayons explique d'une manière très-simple les apparences singulières que présente un prisme équilatéral sur lequel on fait arriver un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure.

Soient MNP (fig. 781) un prisme équilatéral, SI un rayon solaire dans la position du minimum de déviation pour les rayons moyens, et à peu près au tiers du côté MN. Les rayons réfractés à travers le prisme donnent naissance à trois spectres colorés provenant de rayons émergents par chacune des faces du prisme, et à trois images blanches et circulaires du soleil provenant également chacune d'une des faces du prisme. Pour rendre compte de ce phénomène, rappelons-nous d'abord que, quand un rayon dispersé à la première

surface d'un corps réfringent se présente à sa seconde surface, la dispersion disparaît après l'émergence quand la seconde surface est parallèle à la première; mais, quand le rayon éprouve des réflexions intérieures, cette condition n'est point nécessaire, et les rayons émergents redeviennent parallèles toutes les fois qu'ils rencontrent une face sous un angle égal à l'angle moyen de réfraction, et que l'angle obtus est dirigé du côté des rayons qui étaient du côté de l'angle aigu à l'entrée du faisceau dans le corps : car il est facile de voir que l'effet du parallélisme des faces se réduit à satisfaire à ces deux conditions. Cela posé, le rayon SI se divisera au point I en deux parties : l'une sera réfléchie et formera un spectre B, l'autre sera réfractée suivant I I'; au point I' le rayon se divisera encore, une partie sortira pour former le spectre C, l'autre sera réfléchie suivant I' I''; au point I'' une nouvelle division du rayon donnera le spectre B' et le rayon réfléchi I''I''', qui produira le nouveau spectre C' et le rayon I'''I^{IV}; ce dernier donnera un spectre B'' et un rayon $I^{IV}I^{V}$; enfin ce dernier rayon donnera le spectre C'' et le rayon réfléchi I^{V}I, qui se réunira au rayon qui a pénétré dans le prisme. Or il est facile de voir que les spectres B, B', B'' seront blancs, et que les spectres C, C', C'' seront colorés : car les rayons rencontrent toujours les faces du prisme sous des angles égaux entre eux et à l'angle moyen de réfraction du rayon incident; mais ce n'est qu'aux points I', I''' et I^{V} que le rayon rouge est du côté de l'angle obtus.

1282. Il résulte de ce qui précède que, si, au lieu de recevoir le rayon solaire sur un prisme, on le recevait sur une lentille MN (fig. 782), les rayons dispersés par la lentille formeraient leur foyer séparément, et à des distances d'autant plus grandes de la lentille que les rayons seraient moins réfrangibles : ainsi le foyer des rayons violets serait en V, et celui des rayons rouges en R; les rayons des différentes couleurs seraient alors compris dans des cônes ayant une même base, et leur sommet de V en R. Si on reçoit l'image réfractée sur un carton blanc, placé entre V et la lentille, le cône intérieur donnera une image blanche, puisque ce cône renferme des rayons de toutes les couleurs; mais au delà de cette image blanche il y aura des anneaux colorés concentriques, dans lesquels le violet, l'indigo, le bleu, etc., manqueront successivement : la gradation des teintes sera, par conséquent, différente de celle que présente le spectre formé par un seul prisme. A mesure que le carton s'approchera du point V, l'image blanche ira en diminuant; quand il sera

placé en V, elle aura disparu, et le centre sera occupé par le foyer des rayons violets, de V en R il n'y aura point de blanc, et les couleurs changeront de place; au delà du point R l'intersection de l'écran par le cône R'RR' donnera une image blanche, et dans les anneaux colorés qui l'environneront la première couleur qui manquera sera le rouge et la dernière le violet. Il est évident que, si on plaçait en *tt'* un écran circulaire ayant un diamètre peu différent de celui du cône des rayons rouges en ce point, on obtiendrait sur le tableau un anneau de rouge pur, et que, si on le plaçait en *t''t''*, on obtiendrait, au contraire, un anneau violet.

1283. A l'aide du fait bien constaté de l'inégale réfrangibilité des rayons de différentes couleurs, nous pouvons expliquer un grand nombre de phénomènes que présente la vision des corps à travers des prismes. Supposons d'abord que sur une feuille de papier noir on place sur la même ligne horizontale deux petites bandes de papier, l'une peinte en rouge, l'autre en violet. Si on les regarde à travers un prisme dont les arêtes soient horizontales, les deux images ne seront plus placées sur le prolongement l'une de l'autre : l'image violette, ayant éprouvé une plus grande déviation que l'autre, sera plus rapprochée du sommet de l'angle réfringent du prisme; mais comme les matières colorantes rouges et violettes ne produisent jamais des rayons simples, les deux images seront terminées de chaque côté par des franges colorées.

Si on place sur un fond noir un petit carré de papier blanc, il se formera une infinité d'images colorées, ayant des teintes qui se succèdent de la même manière que dans le spectre solaire, et qui seront d'autant plus déviées que les rayons correspondants auront un plus grand pouvoir réfringent. L'angle réfringent du prisme étant au-dessus de l'œil, l'image violette sera la plus élevée et l'image rouge la plus basse; mais, ces images se superposant dans une partie de leur étendue, l'image totale paraîtra blanche dans le lieu de la coïncidence, et elle sera bordée supérieurement par une frange bleue et violette, et inférieurement par une frange jaune et rouge. Quand on regarde avec le prisme une tache noire sur un fond blanc, les franges sont de même couleur, mais leurs places sont changées; c'est-à-dire que le sommet du prisme étant au-dessus de l'œil, les franges violettes sont à la partie inférieure du corps et les franges rouges à la partie supérieure, parce que les franges sont produites par le blanc qui environne le corps noir.

1284. *Teintes composées produites par les mélanges des cou-*

leurs simples. Nous avons vu, dans ce qui précède, que chaque rayon simple ne se divisait plus, et avait une teinte variable comprise entre les deux limites extrêmes, le rouge et le violet. Cependant, en observant ce qui se passe sur la palette du peintre, où il obtient toutes les nuances par le mélange d'un petit nombre de couleurs, plusieurs physiciens avaient pensé que la même chose avait lieu pour certaines couleurs du spectre solaire, par exemple que le violet était un mélange de rayons rouges et bleus, le vert un mélange de rayons bleus et jaunes, etc.; mais il n'en est pas ainsi. A la vérité, chaque bande colorée du spectre renferme une plus ou moins grande quantité de rayons des tranches voisines; mais, en purifiant un des rayons du spectre par une nouvelle réfraction, on obtient des rayons parfaitement simples qui affectent toutes les couleurs.

1285. Tous les corps colorés que nous offre la nature, même les fleurs dont les teintes sont souvent si vives, n'envoient jamais à l'œil des rayons simples : car, si on les regarde à travers un prisme, on voit leur image bordée de franges de différentes couleurs. Les franges ne se manifestent que vers les bords, parce que les bandes colorées qui proviennent des points intérieurs, étant superposées se neutralisent et donnent la teinte générale du corps; par conséquent, celles des points extrêmes, étant les seules isolées, sont les seules visibles.

1286. Newton a fait beaucoup d'essais pour former une teinte blanche en mêlant des poudres colorées; mais il n'a jamais pu obtenir qu'une teinte grisâtre : la raison en est que, ces poudres absorbant toutes une grande quantité de lumière blanche, on doit obtenir une teinte semblable à celle qui proviendrait d'un mélange de blanc et de noir.

1287. Newton appelle couleurs *complémentaires* celles qui, étant réunies, forment de la lumière blanche. Pour obtenir la couleur complémentaire d'une teinte quelconque, Newton a donné la règle suivante : ayant décrit du point C (fig. 783), comme centre, un cercle dont le rayon soit égal à l'unité, et divisé sa circonférence en sept parties proportionnelles aux nombres 1/9, 1/16, 1/10, 1/9, 1/10, 1/16, 1/9, si l'on considère les différents secteurs comme représentant les sept couleurs principales du spectre, et si l'on place aux points *r, o, j, v, b, i, u,* qui sont les centres de gravité des arcs de cercles, des poids proportionnels aux longueurs de ces arcs, le centre de gravité total passera par le point C, et ce sera le cas de la blancheur parfaite que produit la sensation simultanée de toutes

les nuances, lorsqu'elles sont mélangées dans les proportions où elles se trouvent naturellement dans le spectre. Mais, si nous supposons les proportions altérées, il faudra placer sur chaque centre de gravité des poids qui ne seront plus dans le rapport des arcs : alors le centre de gravité ne coïncidera plus avec le point C; il tombera en un point G quelconque; si alors on mène CG, la direction de cette ligne indiquera la nuance dominante du mélange, sa longueur la vivacité de la teinte, et le rayon diminué de GC représentera la quantité de lumière blanche mêlée à la teinte dominante. Le cercle divisé dont nous venons de parler est très-propre pour démontrer que la sensation de la lumière blanche est le résultat des sensations simultanées de toutes les nuances du spectre : en effet, si l'on couvre chaque secteur de la nuance qui lui correspond, en le faisant mouvoir rapidement autour de son centre, on l'apercevra sensiblement blanc.

1288. *Hypothèse de M. Brewster sur la composition de la lumière.* M. Brewster, en analysant le spectre solaire par des verres ou des liquides colorés qui laissent passer seulement certaines teintes, a été conduit à une explication entièrement différente de celle de Newton. M. Brewster pense qu'il n'existe que trois espèces de rayons colorés, les rayons rouges, les rayons jaunes et les rayons bleus; et il admet que dans les rayons d'une même teinte il en existe de différente réfrangibilité; mais que les rayons de différente réfrangibilité ont des intensités différentes, et que le spectre solaire est formé par la superposition de trois spectres rouge, jaune et bleu, de même étendue, mais dans lesquels le maximum d'intensité n'est pas placé de la même manière. Dans le spectre rouge il est près d'une extrémité, dans le spectre jaune, près du milieu, et dans le spectre bleu, vers l'autre extrémité : alors la teinte d'un point quelconque du spectre résulte de la proportion des teintes des trois spectres, et cette teinte renferme toujours une certaine quantité de lumière blanche formée des trois rayons rouge, jaune et bleu, dans les proportions constantes qui constituent la lumière blanche. Il est facile de reconnaître que cette hypothèse explique tous les phénomènes aussi bien que celle de Newton.

Nous rapporterons quelques-unes des expériences sur lesquelles M. Brewster a fondé l'opinion dont il s'agit. Si l'on place l'œil dans la direction d'un faisceau de rayons solaires après qu'il a traversé un prisme de verre blanc, en mettant devant l'œil une lame de verre bleu, l'apparence du spectre est complétement changée; des

bandes noires couvrent le milieu du rouge, tout l'orangé, une partie du vert, une partie considérable du bleu, un peu de l'indigo et très-peu du violet. Le jaune, qui n'a pas été absorbé, a augmenté de largeur; il occupe d'un côté une partie de l'espace où se trouvait l'orangé, et de l'autre une partie de l'espace où se trouvait le vert : ainsi on voit du jaune dans les parties du spectre où se trouvaient l'orangé et le vert, et par conséqeuent ces teintes ne sont pas simples. A la vérité, elles ne peuvent pas être décomposées par la réfraction, étant formées de rayons également réfrangibles; mais elles le sont par l'absorption. Enfin M. Brewster est parvenu à développer de la lumière blanche dans différents points du spectre par des verres colorés, et cette lumière blanche est alors indécomposable par réfraction. Ce dernier fait ne semble pouvoir s'expliquer qu'en admettant que les verres colorés absorbent la teinte en excès sur les proportions de bleu, de rouge et de jaune, qui constituent la lumière blanche.

1289. *Des raies du spectre.* Quand on a pris tout le soin nécessaire pour obtenir un spectre solaire bien pur et d'une étendue suffisante, on y observe plusieurs particularités remarquables qui ont été signalées pour la première fois par Wollaston, mais qui ont été étudiées avec beaucoup de soin par Frauenhoffer, habile artiste de Munich.

Le spectre, observé avec une lunette, est rayé de lignes noires, ou seulement obscures, parallèles, très-irrégulièrement réparties dans son étendue. Ces raies sont tout à fait indépendantes de l'angle réfringent du prisme et de la substance réfringente; dans tous les cas, leur forme et leurs positions relatives ne changent pas.

« La figure 784 représente le spectre solaire tel que l'a trouvé Frauenhoffer, à l'aide des mesures micrométriques les plus exactes et d'un prisme de son incomparable flint-glass. Les sept raies principales, marquées B, C, D, E, F, G, H, qu'il a nommées *raies fixes* dans le spectre, servent de termes de comparaison, parce qu'on les distingue facilement : B se trouve à l'extrême rouge; C, plus haut dans la même couleur; D, dans l'orangé, c'est une grosse ligne double que l'on reconnaît aisément; E se trouve dans le vert, F dans le bleu, G dans l'indigo et H dans le violet. Il y a encore d'autres lignes fort remarquables, telles que *b* dans le vert entre E et F, qui se compose de trois fortes lignes dont les deux premières sont plus rapprochées que la troisième, etc. » (Herschel, *Traité de la lumière.*)

Pour observer ces phénomènes, il faut faire entrer la lumière solaire dans une chambre obscure par une fente étroite; le prisme doit être formé d'une matière bien homogène, et ses arêtes doivent être placées parallèlement à la fente et dans la position de minimum de déviation. A l'œil nu on peut apercevoir quelques-unes des lignes fixes les plus remarquables : c'est ainsi que Wollaston les a aperçues; mais pour les distinguer nettement, on est obligé de les regarder avec une lunette achromatique.

Voici de quelle manière on peut disposer l'appareil. On fixe dans le volet d'une chambre obscure le porte-lumière (fig. 1018 et 1019), et on place dans le tuyau une douille fermée par une plaque mince percée d'une ouverture très-étroite par laquelle passent les rayons solaires : lorsque l'expérience doit durer un certain temps, un héliostat serait bien préférable. Alors on reçoit le faisceau de lumière sur un prisme d'une substance très-pure, dont les arêtes sont parallèles à la fente, et derrière le prisme on place une lunette achromatique. C'est en regardant dans cette lunette toutes les nuances du spectre que l'on distingue facilement les différentes raies. Pour concevoir l'effet produit par la lunette achromatique, il faut remarquer que si l'on regardait directement le prisme, en plaçant l'œil dans le faisceau réfracté, on verrait un spectre dont le lieu serait le point de concours des rayons divergents qui arriveraient à l'œil : alors, si on se sert d'une lentille achromatique, c'est-à-dire qui ne décompose pas la lumière, on verra une image amplifiée du spectre, dans laquelle les couleurs et les raies auront les mêmes positions relatives. Pour que les raies soient aperçues distinctement, il faut que la lunette soit allongée de manière qu'étant dirigée sur la fente du volet, en l'aperçoive distinctement; il faut même changer un peu la position de l'oculaire pour voir bien distinctement les différentes raies : il faut l'enfoncer un peu plus pour les raies qui se trouvent dans le violet que pour celles qui se trouvent dans le rouge. Lorsque le prisme est tourné de manière que l'angle d'incidence excède celui du minimum de déviation, les raies disparaissent; mais elles reparaissent en raccourcissant la lunette. Elles disparaissent également quand l'angle d'incidence est plus petit que celui du minimum de déviation; mais elles deviennent distinctes quand on allonge la lunette. En élargissant l'orifice, les raies les plus fines disparaissent et ensuite les plus larges.

On peut aussi projeter le spectre sur un écran, de manière à

rendre les principales raies visibles en même temps pour toutes les personnes de la salle. Il suffit pour cela de placer dans le faisceau, à sa sortie du prisme, une lentille achromatique et un écran de papier blanc à la distance convenable; la lentille ayant 1 mètre de foyer, elle doit être placée à 2 mètres de l'ouverture, et l'écran à la même distance de la lentille.

Pour mesurer la distance des raies, Frauenhoffer s'est servi d'un appareil désigné sous le nom de *micromètre*. Cet appareil se compose de deux fils métalliques parallèles, tendus dans un cadre placé dans la lunette; un d'eux est fixe et l'autre peut s'éloigner ou se rapprocher du premier à l'aide d'une vis, disposée comme dans la fig. 5 : alors on peut facilement mesurer l'écartement des fils dans une position quelconque. Pour appliquer cet instrument à la mesure de l'écartement de deux raies, on fait coïncider les fils avec les raies, et la position de la vis micrométrique donne leur distance.

Frauenhoffer a constaté par de nombreuses expériences : 1° que, pour la même espèce de lumière, le nombre des raies, leur forme et leurs dispositions sont entièrement indépendantes de l'angle réfringent du prisme ainsi que de la substance réfringente; 2° que les raies sont les mêmes, non-seulement pour la lumière émanée directement du soleil, mais pour celle qui provient indirectement du soleil, telles que celles des planètes, de la lune, du ciel, des nuages; 3° que les spectres provenant de la lumière des étoiles, des flammes, de l'électricité, donnent des raies disposées d'une manière différente; 4° que la lumière électrique, celle des lampes ordinaires et de la flamme de l'alcool, donnent des raies brillantes, tandis que tous les autres foyers de lumière donnent des raies obscures.

Dans le spectre provenant de la lumière d'une lampe, il y a deux lignes brillantes dans le rouge; dans le spectre formé par la lumière électrique, les raies les plus brillantes sont dans le vert et l'orangé : il en existe aussi une plus faible dans le rouge. Frauenhoffer, pour obtenir une ligne lumineuse par l'électricité, réunissait deux conducteurs par un fil de verre de 15 millimètres de longueur et très-fin; un des conducteurs communiquait avec une machine électrique, l'autre avec la terre.

La découverte des raies est d'une très-grande importance, parce que les points fixes que les raies établissent dans le spectre permettent de déterminer avec une grande précision les indices de réfrac-

tion des principaux rayons colorés ; ce que l'on n'avait pu faire jusqu'ici que d'une manière vague.

Le tableau suivant renferme les indices des rayons correspondants aux principales raies pour plusieurs substances et la lumière solaire.

Tableau des indices de réfraction des rayons du spectre correspondants aux principales raies.

SUBSTANCES RÉFRINGENTES.	B	C	D	E	F	G	H
Flint-glass n° 13...	1,627749	1,629681	1,633036	1,642024	1,648260	1,660285	1,671062
Crown-glass.....	1,525832	1,526846	1,529587	1,533005	1,536052	1,660285	1,671062
Eau	1,330933	1,331742	1,333377	1,335831	1,337848	1,341657	1,346566
Eau	1,330977	1,331709	1,333377	1,335849	1,337788	1,341293	1,344177
Dissolution de potasse	1,399629	1,400515	1,402805	1,405632	1,408082	1,341261	1,344162
Huile de térébenthine	1,470496	1,471550	1,474434	1,478353	1,481736	1,412579	1,416368
Flint-glass n° 5....	1,602042	1,603800	1,608494	1,614532	1,620042	1,488198	1,493874
Flint-glass n° 30...	1,625370	1,625477	1,630585	1,637356	1,643466	1,630772	1,640575
Crown-glass n° 13..	1,524312	1,525299	1,527982	1,531372	1,534537	1,655406	1,666072
Crown-glass lett. M.	1,554774	1,555955	1,559075	1,563150	1,566741	1,559908	1,544684
Flint-glass n° 23, prisme de 60°....	1,626596	1,628469	1,633667	1,640495	1,646756	1,573555	1,579470
Flint-glass n° 23, prisme de 45°....	1,626564	1,628454	1,633666	1,640544	1,646780	1,658848 1,658849	1,669686 1,669680

Depuis la découverte de Frauenhoffer, on a reconnu que la lumière d'une lampe, en passant à travers l'acide nitreux, donne un spectre dans lequel on aperçoit des raies noires irrégulièrement disposées, comme dans la lumière solaire, mais qui ne sont pas les mêmes ; la vapeur d'iode et de brome produisent des raies également espacées ; le chlore et l'indigo en vapeur ne produisent rien. Ces expériences peuvent être facilement répétées en employant une lampe à courant d'air, devant laquelle on place un écran percé d'une fente d'un demi-millimètre de largeur, un flacon de huit ou dix centimètres de diamètre renfermant les vapeurs, à 4 mètres un bon prisme de flint-glass, et observant le spectre avec une lunette d'opéra achromatique grossissant de 4 à 5 fois.

Les flammes colorées produisent des spectres à larges raies noires, correspondantes aux teintes qui manquent dans la flamme. On obtient une flamme d'un jaune presque pur en projetant du

soufre dans un creuset incandescent, ou en brûlant de l'alcool mêlé avec un quart d'eau saturée de sel marin; en remplaçant le sel marin par des sels solubles de baryte, de strontiane ou de cuivre, on obtient des flammes vert-pomme, rouge-cramoisi, et bleu-verdâtre. La lumière de la flamme d'alcool mêlée d'eau salée porte souvent le nom de *lumière monochromatique*. Lorsqu'on observe cette flamme à travers un prisme, les contours de l'image sont très-nets; on aperçoit seulement de chaque côté de très-faibles nuances de rouge et de violet.

1290. *Propriétés éclairantes des différentes parties du spectre.* D'après M. Herschel, le maximum de lumière existe dans les rayons jaunes et verts, et diminue insensiblement jusqu'au rouge et au violet, et c'est dans cette dernière teinte que se trouve le minimum. Newton avait déjà annoncé des résultats peu différents. On peut vérifier ce fait en faisant tomber le spectre sur un livre imprimé, et déterminant approximativement les distances auxquelles on peut apercevoir distinctement les caractères éclairés par les différents rayons.

1291. *Propriétés calorifiques des rayons du spectre.* On avait supposé d'abord que la partie la plus lumineuse du spectre devait posséder en même temps la plus grande chaleur, et par conséquent que le maximum de chaleur existait dans le jaune; mais des expériences de M. Bérard fixèrent ce maximum dans le rouge; d'autres, de M. Herschel, le plaçaient dans la bande obscure qui suit le rouge. En 1828, M. Seebeck reconnut que la position du maximum de chaleur dépendait de la nature du prisme réfringent : car, en employant des prismes d'eau, d'acide sulfurique, de verre ordinaire et de flint-glass, le maximum existait dans le jaune, l'orangé, le rouge, ou au delà du rouge, dans la partie obscure du spectre. D'après les nouvelles expériences de M. Melloni, le maximum est d'autant plus écarté du jaune vers le rouge que la matière du prisme est plus diathermane; pour le sel gemme, le maximum est au delà du rouge à une distance égale à la distance du rouge au jaune. En décomposant le faisceau de lumière solaire par un prisme de sel gemme, et le faisant passer ensuite à travers une lame d'eau renfermée entre deux plaques de verre parallèles, le maximum se rapproche du rouge, et pénètre dans le spectre à mesure qu'on augmente l'épaisseur de la couche d'eau. Pour une épaisseur de 4 millimètres, le maximum est dans le rouge; pour une épaisseur de 300 millimètres, il est dans le jaune. Des lames de verre d'é-

paisseurs croissantes produisent les mêmes effets, mais avec moins d'énergie. Lorsqu'on substitue aux lames d'eau ou de verre des plaques de verre coloré, certains rayons colorés sont absorbés, et le spectre lumineux est interrompu par des bandes plus ou moins obscures, tandis que le spectre calorifique n'éprouve aucun changement correspondant dans sa forme et sa position, mais seulement des variations d'intensité qui affectent tous ses points. Enfin, si l'on fait passer le faisceau à travers l'eau et un verre vert, coloré par de l'oxyde de cuivre, on parvient à faire disparaître complétement le spectre calorifique; et le faisceau lumineux, concentré par une lentille, en un point où la lumière d'un jaune verdâtre a un éclat comparable à la lumière directe du soleil, n'y produit pas de chaleur appréciable aux thermoscopes les plus sensibles. Il semble résulter de tous les faits que nous venons de rapporter, que la chaleur et la lumière du soleil sont deux choses distinctes.

On peut se rendre compte du déplacement du maximum de chaleur, dans le spectre calorifique formé avec un prisme de sel gemme, par l'interposition d'une lame diathermane, en admettant que le coefficient d'absorption diminue avec la réfrangibilité. Quant aux changements de position de ce maximum, quand on emploie des prismes de différentes matières, ils proviennent probablement et de la variation des coefficients d'absorption des différents rayons, et des chemins que les rayons ont parcourus dans les prismes.

1292. *Propriétés chimiques des rayons du spectre.* La lumière solaire a une grande influence sur plusieurs phénomènes chimiques : elle est nécessaire à la formation des parties vertes des plantes, elle détermine la combinaison du chlore et de l'hydrogène, elle fait passer au violet le chlorure d'argent, etc. Il était important de vérifier si cette propriété appartient également à tous les rayons. Schèele reconnut le premier, que le rayon violet agissait plus fortement sur le chlorure d'argent que les autres rayons; Sennebier découvrit ensuite, que le rayon violet avait aussi plus d'influence sur le développement de la partie verte des végétaux. Wollaston, Ritter, Beckmann et Bérard ont constaté, depuis, que l'action chimique s'étendait au delà du spectre, du côté des rayons violets. Pour donner une idée de la différence d'action chimique des rayons rouges et violets, nous rapporterons une des expériences de Bérard. Ayant concentré au moyen de deux lentilles les rayons rouges et les rayons violets, du chlorure d'argent, placé au foyer des rayons violets, était coloré en moins de cinq

minutes, tandis que celui qui était placé au foyer des rayons rouges n'avait éprouvé aucune altération après deux heures.

M. E. Becquerel a fait récemment, sur cet objet, des recherches qui l'ont conduit à des résultats importants que nous indiquerons sommairement. En recevant le spectre solaire sur une plaque d'argent ioduré, préparé à la manière de M. Daguerre (*Voir* l'article 1361), l'exposant pendant une ou deux minutes à l'action de la lumière du spectre, et la passant ensuite à la vapeur mercurielle, on remarque que la plaque est principalement impressionnée depuis l'indigo jusqu'à une certaine distance de l'extrême violet, et qu'elle est traversée par un grand nombre de raies, qui correspondent exactement à celles du spectre lumineux. En opérant avec des plaques iodurées, puis passées à la vapeur de chlore ou de brome, circonstances qui augmentent la sensibilité de l'iodure d'argent, on obtient les mêmes effets en quelques secondes. Lorsque l'action est prolongée pendant quelques minutes, l'image est plus étendue et plus marquée au delà du violet, tandis que de l'autre côté, la plaque est noircie. Après une heure d'action, l'effet s'étend et se prolonge au delà du violet en produisant des raies qu'on ne peut plus comparer à celles du spectre lumineux.

En employant des papiers couverts de chlorure ou de bromure d'argent, on obtient les mêmes résultats; seulement l'effet est en sens contraire du spectre coloré, les parties correspondantes aux rayons chimiques deviennent noires, et les raies sont blanches; en outre, le maximum d'action ne se trouve pas à la même place, mais il est toujours situé à peu près entre G et H (fig. 784).

M. E. Becquerel a aussi reconnu que certains rayons qui n'exercent point d'action chimique, jouissent de la propriété d'augmenter cette action, lorsqu'elle est déjà commencée; il les désigne pour cette raison, sous le nom de rayons *continuateurs* : nous y reviendrons en parlant des épreuves daguerriennes. C'est à ces rayons que M. E. Becquerel attribue les raies qui se prolongent jusqu'au rouge.

Il existe un grand nombre de corps qui jouissent de la propriété singulière de devenir lumineux, pendant un certain temps, dans l'obscurité, lorsqu'ils ont été exposés à la lumière solaire : tels sont les sulfures de calcium, de strontium et de baryum, et le chlorure de calcium fondu, qu'on désignait autrefois sous le nom de phosphores. Il était important d'examiner si les différents rayons du spectre agissent de la même manière. M. E. Becquerel a fait sur ce sujet

des expériences nombreuses en soumettant à l'action du spectre du papier gommé et saupoudré de chlorure de calcium. Il a reconnu dans l'apparence de la feuille de papier, lorsque la lumière était interceptée, c'est-à-dire dans le spectre phosphorogénique, les mêmes raies que dans le spectre coloré; que des rayons invisibles situés au delà du violet jouissaient de la propriété de produire la phosphorescence, et qu'il existait, au contraire, de l'autre côté du spectre des rayons qui avaient la propriété de détruire la phosphorescence. Ainsi, il paraît probable que le spectre lumineux s'étend au delà des limites apparentes pour nos organes, et que les rayons qui produisent la lumière sont les mêmes que ceux qui occasionnent les actions chimiques et la phosphorescence.

1293. *De la dispersion.* On désigne sous le nom de *dispersion*, la différence des indices de réfraction d'une même substance pour les rayons extrêmes du spectre : ainsi, en représentant par n_v l'indice des rayons violets, par n_r l'indice des rayons rouges, la dispersion sera représentée par $n_v - n_r$.

$n_v - n_r$, multiplié par le sinus d'incidence, représente sensiblement l'angle dans lequel les rayons de différentes couleurs sont étalés, quand un rayon de lumière blanche passe d'un milieu dans l'air, sous un angle d'incidence très-petit. En effet, considérons un rayon de lumière blanche AB (fig. 785) se présentant sous un angle d'incidence i très-petit, à la seconde surface MN d'un corps réfringent, et soient BV et BR les directions des rayons émergents violets et rouges : les écarts de ces deux rayons étant très-petits, l'angle qu'ils forment entre eux sera sensiblement égal à $\sin r' - \sin r$; mais l'incidence commune étant i, on a $\sin r' = n_v \sin i$, et $\sin r = n_r \sin i$, et par conséquent $\sin r' - \sin r = (n_v - n_r) \sin i$.

D'après le tableau précédent (p. 383), la dispersion de la lumière comprise entre la première raie et la septième, serait exprimée par les nombres suivants :

Flint-glass, n° 13	0,043313
Crown-glass, n° 9	0,020734
Eau	0,013242
Eau	0,013185
Dissolution de potasse	0,016739
Térébenthine	0,023378
Flint-glass, n° 3	0,038331
Flint-glass, n° 30	0,042502
Crown-glass, lett. M	0,024696
Flint-glass, n° 23, prisme de 60°	0,043090
Flint-glass, n° 23, prisme de 45°	0,043116

On désigne sous le nom de *pouvoir dispersif*, la dispersion divisée par l'indice moyen de réfraction, celui du rayon jaune, diminué de l'unité; ainsi, en admettant la notation précédente, le pouvoir dispersif sera représenté par

$$\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}.$$

Cette expression représente sensiblement le rapport entre l'angle occupé par les rayons colorés et la déviation du rayon jaune, quand la lumière passe d'un milieu réfringent dans l'air sous un angle d'incidence très-petit : car, d'après ce qui précède, le premier angle est représenté par $\sin i\,(n_v - n_r)$, et le second par $\sin i\,(n_j - 1)$.

Le tableau suivant, extrait de l'*Encyclopédie* de M. Brewster, renferme les dispersions et les pouvoirs dispersifs d'un grand nombre de substances; ces nombres ont été obtenus en prenant les indices des rayons extrêmes et celui du jaune verdâtre. Ils ne présentent pas, à beaucoup près, la même exactitude que si les teintes avaient été rapportées aux raies du spectre, car la position des rayons colorés offre un peu d'incertitude; mais ces observations sont antérieures à la découverte des raies.

Tableau des dispersions et des pouvoirs dispersifs de plusieurs substances.

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS DISPERSIFS, OU $\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$	DISPERSIONS, OU $n_v - n_r$
Chromate de plomb, maximum estimé à.	0,400	0,770
Chromate de plomb, *id.*, doit excéder...	0,296	0,570
Réalgar fondu.....	0,267	0,394
Chromate de plomb, minimum.....	0,262	0,388
Réalgar fondu.....	0,255	0,374
Huile de cassia.....	0,139	0,089
Soufre, après la fusion.....	0,130	0,149
Phosphore.....	0,128	0,156
Sulfure de carbone.....	0,115	0,077
Baume de Tolu.....	0,103	0,065
Baume du Pérou.....	0,093	0,058
Carbonate de plomb, maximum.....	+ 0,091	0,091
Aloès des Barbades.....	0,085	0,058
Huile d'amandes amères.....	0,079	0,048
Huile d'anis.....	0,077	0,044
Acétate de plomb fondu.....	0,069	0,040
Baume styrax.....	0,067	0,039

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS DISPERSIFS, OU $\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$	DISPERSIONS, OU $n_v - n_r$
Gaïac	0,066	0,041
Carbonate de plomb, minimum	0,066	0,056
Huile de cumin	0,065	0,033
Huile essentielle de tabac	0,064	0,035
Gomme ammoniaque	0,063	0,037
Huile de goudron des Barbades	0,062	0,032
Huile de girofle	0,062	0,033
Verre vert	0,061	0,037
Sulfate de plomb	0,060	0,056
Verre rouge foncé	0,060	0,044
Huile de sassafras	0,060	0,032
Chlorure d'antimoine	0,059	0,036
Verre opale	0,060	0,038
Résine	0,057	0,032
Huile de fenouil	0,055	0,028
Huile de menthe sauvage	0,054	0,026
Verre orangé	0,053	0,042
Sel gemme	0,053	0,029
Caoutchouc	0,052	0,028
Huile de piment	0,052	0,026
Flint-glass	0,052	0,032
Verre pourpre foncé	0,051	0,031
Huile d'angélique	0,051	0,025
Huile de thym	0,050	0,024
Huile de fenugrec	0,050	0,024
Huile d'absinthe	0,049	0,022
Huile de pouliot	0,049	0,024
Huile de carvi	0,049	0,024
Huile de dill	0,049	0,023
Huile de bergamote	0,049	0,023
Flint-glass	0,048	0,029
Térébenthine de Chio	0,048	0,028
Encens	0,048	0,028
Huile de limon	0,048	0,023
Flint-glass	0,048	0,028
Huile de genièvre	0,047	0,022
Huile de camomille	0,046	0,021
Gomme de genièvre	0,046	0,025
Carbonate de strontiane, maximum	0,046	0,032
Huile de brick (*oil of brick*)	0,046	0,021
Acide azotique	0,045	0,019
Huile de lavande	0,045	0,021
Baume de soufre	0,045	0,023
Ecaille de tortue	0,045	0,027
Corne	0,045	0,025
Baume de Canada	0,045	0,024
Huile de marjolaine	0,045	0,022
Gomme oliban	0,045	0,024
Acide hypoazotique	0,044	0,018
Huile de cajeput	0,044	0,021
Huile d'hysope	0,044	0,022

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS DISPERSIFS, OU $\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$	DISPERSIONS, OU $n_v - n_r$
Huile de bois de Rhodes	0,044	0,022
Verre rose	0,044	0,025
Huile de sabine	0,044	0,021
Huile de pavot	0,044	0,020
Zircon, maximum	0,044	0,045
Acide chlorhydrique	0,043	0,016
Copal	0,043	0,024
Huile de noix	0,043	0,022
Poix de Bourgogne	0,033	0,024
Huile de térébenthine	0,042	0,020
Huile de romarin	0,042	0,020
Feldspath	0,042	0,022
Glu	0,041	0,022
Baume de copahu	0,041	0,021
Ambre	0,041	0,023
Huile de muscade	0,041	0,021
Stilbite	0,041	0,021
Huile de menthe poivrée	0,040	0,019
Rubis spinelle	0,040	0,031
Spath calcaire, maximum	0,040	0,027
Huile de colza	0,040	0,019
Verre de bouteille	0,040	0,023
Tartrate de potasse et de soude	0,039	0,020
Gomme élémi	0,039	0,021
Sulfate de fer	0,039	0,019
Diamant	0,038	0,056
Huile d'olive	0,038	0,018
Gomme mastic	0,038	0,022
Blanc d'œuf	0,037	0,013
Huile de rue	0,037	0,016
Gomme myrrhe	0,037	0,020
Béryl	0,037	0,022
Obsidienne	0,037	0,018
Ether	0,037	0,012
Sélénite	0,037	0,020
Alun	0,036	0,017
Huile	0,036	0,018
Sulfate de cuivre	0,036	0,019
Crown très-vert	0,036	0,020
Gomme arabique	0,036	0,018
Sucre, après la fusion et refroidi	0,036	0,020
Colle de poisson	0,035	0,013
Eau	0,035	0,012
Humeur aqueuse de l'œil d'un poisson	0,035	0,012
Humeur vitrée du même	0,035	0,012
Acide azotique	0,035	0,019
Rubellite	0,035	0,027
Leucite	0,035	0,018
Epidote	0,035	0,024
Verre de borax	0,034	0,018
Grenat	0,033	0,027

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS DISPERSIFS, OU $\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$	DISPERSIONS, OU $n_v - n_r$
Pyrope	0,033	0,026
Chrysolithe	0,033	0,022
Crown	0,033	0,018
Huile d'ambre gris	0,032	0,012
Huile de vin	0,032	0,012
Acide phosphorique solide	0,032	0,017
Verre de phosphore	0,03157	0,017
Verre à vitres	0,032	0,017
Acide sulfurique	0,031	0,014
Acide tartrique	0,030	0,016
Azotate de potasse, minimum	0,03040	0,009
Borax	0,030	0,014
Axinite	0,030	0,022
Alcool	0,029	0,011
Sulfate de baryte	0,029	0,011
Tourmaline	0,028	0,019
Acide phosphorique liquide	0,0283	0,012
Carbonate de baryte, minimum	0,0285	0,015
Carbonate de strontiane, minimum	0,027	0,015
Cristal de roche	0,026	0,014
Emeraude	0,026	0,015
Verre de borax	0,026	0,014
Spath calcaire, minimum	0,026	0,016
Saphir bleu	0,026	0,025
Topaze bleue de Caimgorm	0,025	0,016
Chrysobéryl	0,025	0,019
Topaze bleue d'Aberdeenshire	0,024	0,016
Sulfate de strontiane	0,024	0,015
Acide cyanhydrique	0,022	0,080
Acide malique	0,0280	0,011
Spath fluor	0,022	0,010
Cryolithe	0,029	0,007

1294. *Achromatisme.* Un prisme est dit *achromatique* quand il jouit de la propriété de dévier la lumière sans la disperser; une lentille est également achromatique lorsqu'elle ne disperse point la lumière, en conservant ses propriétés focales. Ainsi, des prismes et des lentilles sont achromatiques quand les images que l'on voit à travers leur épaisseur ont les teintes des images vues directement et ne sont point terminées par des franges irisées. Les prismes et les lentilles achromatiques se forment par la réunion de prismes et de lentilles de différents verres incolores inégalement dispersifs.

Newton, par suite d'expériences inexactes, avait cru que les rap-

ports des déviations des différents rayons restaient constants, quelle que fût la nature du milieu réfringent; il en résultait alors que la différence des déviations des rayons extrêmes, ou l'angle dans lequel les rayons de différentes teintes sont étalés, était proportionnelle à la déviation d'un rayon quelconque, et par suite que l'achromatisme était incompatible avec une déviation quelconque. Cette erreur subsista longtemps. Euler soupçonna le premier la possibilité de l'achromatisme par cette seule considération qu'il existe dans le cristallin. En 1733, Hall, gentilhomme du comté de Worcester, s'aperçut le premier de l'erreur de Newton en constatant que le pouvoir dispersif varie dans les différentes espèces de verre; mais ce ne fut qu'en 1757 que Jean Dollond, habile opticien de Londres, rendit cette découverte publique.

1295. Les prismes achromatiques sont ordinairement composés de deux prismes, l'un de verre ordinaire (crown-glass), l'autre de verre renfermant une grande quantité de plomb (flint-glass), et dont les angles réfringents sont opposés. Pour concevoir comment l'achromatisme peut exister, considérons un prisme traversé par un faisceau de lumière blanche. Si l'on place derrière ce prisme un autre prisme, de même angle et de même substance, dans une position contraire, de manière que les faces voisines soient parallèles, la dispersion et la déviation produites par le premier prisme seront détruites par le second, puisque leur système formera une plaque à faces parallèles. Supposons maintenant que le second prisme soit formé d'une substance plus dispersive que celle du premier : comme la dispersion augmente avec l'angle du prisme, le second prisme, pour rendre l'image incolore, devra avoir un angle réfringent plus petit que le premier; et l'image sera sensiblement blanche, tout en conservant une certaine déviation.

Les réfrangibilités des différents rayons colorés ne conservant pas entre eux les mêmes rapports, il faudrait à la rigueur employer autant de prismes que l'on voudrait achromatiser de rayons colorés; mais comme les variations de ces rapports sont peu considérables, lorsqu'on a rendu parallèles, après leur émergence, les rayons qui se trouvent aux limites du spectre, tous les autres sont sensiblement parallèles. Alors, en déterminant le rapport des angles réfringents des deux prismes, de manière à satisfaire à cette condition, leur système est suffisamment achromatique. Mais quand on veut avoir une plus grande exactitude, on emploie trois prismes, dont

on détermine les angles, par la condition de l'achromatisme des rayons rouges, violets et jaunes.

Cette détermination s'effectue très-facilement quand les angles des prismes sont très-petits, et que les rayons les traversent presque perpendiculairement.

Considérons d'abord (fig. 786) un rayon Im, rencontrant un prisme sous un angle quelconque : en désignant par i et e les angles d'incidence et d'émergence, par r et r' les angles de réfraction, par a l'angle du prisme, et par δ la déviation, le triangle kmn donnera $\delta = i - r + e - r'$; et, comme $r + r' = a$, il vient $\delta = i + e - a$. Si l'on suppose que l'angle a soit très-petit, et que n_v représente l'indice pour le rayon violet, on aura $i = n_v r'$; et il viendra

$$\delta = a(n_v - 1).$$

Pour un autre prisme, dont l'indice pour le même rayon serait n'_v, on aurait

$$\delta' = a'(n'_v - 1);$$

et, si les prismes étaient accolés et placés en sens contraire, en désignant par D la déviation totale, on aurait

$$D = a(n_v - 1) - a'(n'_v - 1).$$

Représentons maintenant par n_r et n'_r les indices des deux prismes pour le rayon rouge, et par D′ leur déviation, on aura de même

$$D' = a(n_r - 1) - a'(n'_r - 1);$$

or, pour que l'achromatisme existe pour ces deux rayons, il faut que $D = D'$: on a alors

$$a(n_v - 1) - a'(n'_v - 1) = a(n_r - 1) - a'(n'_r - 1); \text{ d'où } a' = a\frac{n_v - n_r}{n'_v - n'_r},$$

équation à l'aide de laquelle on trouvera l'angle du second prisme, celui du premier étant connu. Il faut remarquer que, d'après la dernière équation, les angles des prismes sont en raison inverse de leur dispersion; et on voit, d'après cela, que, si la dispersion était proportionnelle à la déviation, comme Newton l'avait supposé, on aurait

$$\frac{n_v - n_r}{n'_v - n'_r} = \frac{n_r - 1}{n'_r - 1}, \quad \text{et, par suite,} \quad a(n_r - 1) = a'(n'_r - 1).$$

La déviation D serait nulle et, par conséquent, l'achromatisme impossible.

Si l'on voulait achromatiser trois ou un plus grand nombre de rayons, il faudrait employer le même nombre de prismes, et l'on trouverait facilement les équations nécessaires à la détermination des angles de ces prismes en fonction de l'un d'eux.

1296. On peut déterminer par l'expérience, le rapport que doivent avoir les angles de deux prismes de substances différentes

pour que leur ensemble soit achromatique, en prenant un prisme de la première substance, et en appliquant contre une de ses faces un prisme de la seconde dont l'angle soit variable, regardant à travers l'ensemble, et faisant varier l'angle du second prisme, jusqu'à ce que les franges irisées qui bordent les images aient disparu, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'on ait satisfait à la condition de l'achromatisme. On peut facilement rendre variable l'angle du second prisme, quand il doit être formé d'une substance liquide, en renfermant ce liquide entre deux glaces dont on puisse changer l'inclinaison. Mais quand la matière du deuxième prisme doit être solide, et c'est ce qui a lieu ordinairement, on peut employer un prisme composé de deux parties A et B (fig. 787), terminées par un plan et une portion de cylindre à base circulaire : en faisant tourner les surfaces cylindriques l'une sur l'autre, on fait varier l'angle des faces planes. Cette méthode est peu employée, à cause de la difficulté de travailler les surfaces cylindriques, concaves et convexes qui se trouvent dans les deux parties du prisme; la suivante est bien préférable. On prend un prisme triangulaire droit de flint-glass, sans stries (fig. 788), dont la longueur soit assez considérable pour qu'on puisse le diviser en deux autres par un plan perpendiculaire aux arêtes; on obtient ainsi deux prismes parfaitement égaux. Il est évident que, s'ils sont placés de manière que leurs arêtes soient parallèles et que les angles réfringents égaux soient opposés, le prisme formé par leur réunion aura un angle nul; et qu'en faisant tourner un des prismes autour d'un axe perpendiculaire à la face commune, l'autre restant fixe, on obtiendra un prisme dont l'angle variera d'une manière continue, de zéro au double de l'angle A. Pour produire ce mouvement d'une manière commode, les deux prismes sont fixés avec du mastic dans des douilles de cuivre qui s'emboîtent; en plaçant une division sur l'une d'elles et un index sur l'autre, on peut reconnaître dans chaque position, l'angle formé par les sections principales des deux prismes, et, par les formules de la trigonométrie sphérique, l'angle du prisme composé, quand on connaît l'angle réfringent commun des prismes simples. Cet instrument, désigné sous le nom de *diasporamètre*, est dû à Rochon.

Pour trouver l'angle x, du prisme composé, en fonction de l'angle i de chacun des deux prismes, et de l'angle φ, dont on a tourné l'un d'eux, soient OP (fig. 789) une perpendiculaire à la face de contact des deux prismes, OP′ une perpendiculaire à l'autre face du prisme fixe, et OP″ une perpendiculaire

à la face extérieure de l'autre prisme : dans le triangle sphérique qmp, on a $\cos x = \cos^2 i + \sin^2 i \cos \varphi$; d'où l'on tire $1 - \cos x = \sin^2 i (1 - \cos \varphi)$, et, par suite, $\sin \frac{x}{2} = \sin^2 i \sin \frac{\varphi}{2}$.

1297. Lorsqu'on emploie un prisme achromatique dans lequel on a rendu parallèles les rayons extrêmes, les autres rayons, comme nous l'avons déjà dit, ne coïncident pas, et le prisme produit un nouveau spectre, très-étroit par rapport à celui de chaque prisme en particulier, et dont les teintes extrêmes sont le vert et le jaune orangé. Ces spectres ont été désignés sous le nom de *spectres secondaires*.

1298. D'après le docteur Brewster, si l'on forme avec deux des substances renfermées dans la liste suivante, des prismes composés réunissant les rayons rouges et violets extrêmes, le rayon vert sera dévié de la direction du faisceau émergent, et se rapprochera de celle du rayon réfracté par la substance qui précède l'autre dans cette liste.

1. Acide sulfurique.
2. Acide phosphorique.
3. Acide sulfureux.
4. Acide phosphoreux.
5. Acide sulfhydrique.
6. Eau.
7. Glace.
8. Blanc d'œuf.
9. Cristal de roche.
10. Acide azotique.
11. Acide cyanhydrique.
12. Acide chlorhydrique.
13. Acide hypoazotique.
14. Acide acétique.
15. Acide malique.
16. Acide citrique.
17. Spath fluor.
18. Topaze (bleue).
19. Béryl.
20. Sélénite.
21. Leucite.
22. Tourmaline.
23. Borax.
24. Borax (verre de).
25. Ether.
26. Alcool.
27. Gomme arabique.
28. Crown-glass.
29. Huile d'amandes douces.
30. Soude et tartrate de potasse.
31. Gomme de genièvre.
32. Sel gemme.
33. Spath calcaire.
34. Huile d'ambre gris.
35. Huile de genièvre.
36. Huile de spermacéti.
37. Huile de navette.
38. Huile d'olive.
39. Zircon.
40. Flint-glass.
41. Huile de Rhodes.
42. Huile de romarin.
43. Huile de sainfoin.
44. Baume de copahu.
45. Huile de noix.
46. Huile de sabine.
47. Huile de rue.
48. Huile de faîne.
49. Azotate de potasse.
50. Diamant.
51. Résine.
52. Gomme copal.
53. Huile de castor.
54. Huile de camomille.
55. Huile d'anet.
56. Huile d'absinthe.
57. Huile de marjolaine.
58. Huile de bergamote.

59. Huile de menthe.
60. Huile de thym.
61. Huile de muscade.
62. Huile de carvi.
63. Huile de citron.
64. Ambre.
65. Huile de menthe crépue.
66. Huile d'hysope.
67. Huile de pavot.
68. Huile de pouliot.
69. Huile de sauge.
70. Huile de térébenthine.
71. Baume de Canada.
72. Huile de lavande.
73. Chlorure d'antimoine.
74. Huile de clous de girofle.
75. Huile de fenouil.
76. Verre de couleur rouge.
77. Verre orangé.
78. Verre opale.
79. Acétate de plomb (dissous).
80. Huile d'ambre.
81. Huile de sassafras.
82. Huile de cumin.
83. Huile d'anis.
84. Huile essentielle d'amandes amères.
85. Carbonate de plomb.
86. Baume de Tolu.
87. Sulfure de carbone.
88. Soufre.
89. Huile de casse.

1299. Si l'on employait trois prismes partiels, le prisme composé produirait des spectres beaucoup plus petits, qu'on désigne sous le nom de *spectres tertiaires*, etc.

1300. On peut facilement conclure de ce que nous avons dit [1279] qu'il serait toujours possible d'achromatiser un prisme, quelque grand que fût son angle réfringent, à l'aide d'un autre prisme de même matière ou de matière différente, dont l'angle pourrait être aussi petit qu'on voudrait, en présentant ce second prisme au premier sous un angle convenable. En effet, en faisant varier l'inclinaison du second prisme, on pourra toujours obtenir une dispersion égale à celle du premier, car la dispersion augmente avec la déviation; et, comme dans un même prisme, ou dans des prismes de la même substance, la dispersion ne croît pas proportionnellement à la déviation, l'achromatisme laissera toujours subsister une certaine déviation.

1301. Quand on emploie deux prismes, on ne détermine pas les angles réfringents de manière à compenser les déviations des rayons qui forment les limites extrêmes du spectre, parce qu'ils sont trop peu lumineux pour que leur compensation soit importante; on compense les rayons qui ont le plus d'éclat, tels que les rayons D et F (fig. 784), qui appartiennent à l'orangé et au vert. Si l'on employait trois prismes, ce serait les rayons C, F et G qu'il faudrait achromatiser.

1302. *Lentilles achromatiques.* Nous avons déjà dit que, quand un faisceau de lumière blanche était réfracté à travers une lentille, les rayons de différentes couleurs formaient leurs foyers à part, dans l'ordre violet, indigo..., rouge, à partir de la lentille; les lentilles achromatiques sont celles qui réunissent tous ces foyers

en un même point. Les lentilles achromatiques se construisent en réunissant plusieurs lentilles de verre douées de pouvoirs dispersifs différents, ordinairement de flint-glass et de crown-glass. Il en est des lentilles comme des prismes : on ne pourrait réellement parvenir à un achromatisme complet, qu'en employant une infinité de lentilles différentes; mais ordinairement on en emploie deux, dont on détermine les courbures de manière à achromatiser les rayons rouges et les rayons jaunes. Quand on emploie trois lentilles, ce sont les rayons C, F et G (fig. 784) que l'on réunit : alors l'achromatisme est aussi parfait qu'on puisse le désirer. Lorsqu'on emploie seulement deux lentilles, leurs courbures peuvent être calculées au moyen de la formule renfermée dans l'article suivant.

Soient Pa (fig. 790) un rayon incident, ab le rayon réfracté dans la première lentille, bP′ la direction du rayon émergent dans l'air, bc le rayon réfracté dans la seconde lentille, et cP″ le rayon émergent. P′ est le foyer conjugué de P par rapport à la première lentille, P′ et P″ sont également des foyers conjugués relativement à la seconde lentille : car, si un rayon incident partait du point P″, il traverserait la lentille dans la direction cb, et émergerait dans une direction telle, que si un rayon arrivait dans cette direction il traverserait la lentille suivant bc, et cette direction est évidemment celle de bP′. Ainsi, en désignant par n_v et n'_v les indices d'un même rayon pour la substance de la première et de la seconde lentilles, on aura

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{a}, \quad \text{et } a=\frac{RR'}{(n_v-1)(R+R')},$$

$$\frac{1}{p''}-\frac{1}{p'}=-\frac{1}{a'}, \text{ et } a'=-\frac{R'R''}{(n'_v-1)(R'+R'')};$$

et, en ajoutant les deux premières équations, il viendra

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a}-\frac{1}{a'}.$$

Pour un autre rayon incident dont les indices seraient n_r et n'_r, on aurait

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p''_1}=\frac{1}{a_1}-\frac{1}{a'_1}, \quad \text{et} \quad \begin{cases} a_1=\dfrac{RR'}{(n_r-1)(R+R')}, \\ a'_1=-\dfrac{R'R''}{(n'_r-1)(R'+R'')}. \end{cases}$$

Si l'on pose $p''=p''_1$, il vient $\frac{1}{a}-\frac{1}{a'}=\frac{1}{a_1}-\frac{1}{a'_1}$; et, en substituant pour a, a', a_1, a'_1, leurs valeurs, on trouve

$$R''=\frac{RR'(n'_r-n'_v)}{(R+R')(n_v-n_r)-R(n'_v-n'_r)};$$

et, quand $R = R'$, il vient

$$R'' = \frac{R(n'_v - n'_r)}{2(n_v - n_r) - (n'_v - n'_r)}.$$

Dans tous les cas, la valeur de R'' étant indépendante de p, l'achromatisme existe, quelle que soit la position du point lumineux.

1303. *Absorption de la lumière par les milieux transparents.* Il n'existe aucun milieu dont la transparence soit parfaite; tous absorbent une partie plus ou moins grande de la lumière qui les traverse. L'air qui est le plus transparent de tous les corps, éteint complétement la lumière d'un grand nombre d'étoiles, qui ne deviennent visibles que quand on s'élève sur de hautes montagnes; on sait aussi que la transparence de l'eau et du verre diminue à mesure que leur épaisseur augmente. Il est également très-probable, qu'il n'existe point non plus de corps complétement opaques, et que, si l'on pouvait former avec tous les corps des lames suffisamment minces, elles seraient transparentes : car l'or en lames très-minces est perméable à la lumière; cette lumière ne provient pas de celle qui passe à travers les interstices que l'on pourrait supposer dans les lames d'or très-minces, car cette lumière est colorée en vert. L'absorption de la lumière par les milieux transparents, n'affecte pas de la même manière tous les rayons dont se compose la lumière blanche, car la lumière qui a traversé un milieu transparent est toujours colorée. Celle qui a traversé une grande épaisseur d'air est bleue : celle qui a traversé une lame de verre ordinaire, d'une épaisseur suffisante, a une teinte verte plus ou moins foncée; enfin il existe un grand nombre de corps qui ne laissent passer que certains rayons colorés.

La diminution d'intensité que la lumière homogène, éprouve en traversant les corps diaphanes, provient des réflexions à la première et à la seconde surface, et de l'absorption. D'après Bouguer, la lumière qui traverse perpendiculairement une plaque de verre de l'épaisseur des glaces ordinaires, éprouve, par ces trois causes réunies, une diminution de 0,1, et la perte due à la réflexion sur la première surface est d'environ 0,03.

1304. Pour expliquer les différents phénomènes d'absorption dont nous venons de parler, on a admis qu'un même milieu avait un pouvoir absorbant variable avec la couleur des rayons, et que, si l'on divisait le corps en lames très-minces d'égale épaisseur, un rayon quelconque, en traversant une quelconque de ces tranches, était toujours réduit à la même fraction de son inten-

sité à l'entrée de la tranche : il résulte nécessairement de cette dernière supposition, que l'intensité d'un rayon qui a traversé un milieu diminue en progression géométrique, quand l'épaisseur augmente en progression arithmétique, et que, si l'on désigne par i l'intensité du rayon incident, par a le rapport constant entre l'intensité du rayon à la sortie et à l'entrée d'une même tranche, dont l'épaisseur est prise pour unité, ia^e représentera l'intensité du rayon émergent qui a traversé une épaisseur égale à e. Cette formule satisfait complétement aux phénomènes observés. D'abord, on a reconnu que, quand l'épaisseur des milieux colorés diminue, leur teinte s'affaiblit, et qu'ils deviennent tout à fait incolores quand leur épaisseur est très-petite; cette circonstance est indiquée par la formule : car, si $e = 0$, l'intensité du rayon transmis est indépendante de sa teinte. En second lieu, on a reconnu que la teinte des milieux colorés, dont on fait croître successivement l'épaisseur, augmente d'abord très-rapidement et ensuite très-peu; par exemple, en renfermant un liquide coloré entre deux lames de verre très-peu inclinées, dans l'arête même du prisme liquide, la teinte est blanche, elle se fonce rapidement quand on s'éloigne du sommet du prisme, mais à une certaine distance la teinte augmente d'une manière presque insensible. La formule précédente s'accorde encore très-bien avec ce mode de variations. Enfin cette même formule explique la variation de teintes de certains milieux quand on augmente leur épaisseur; par exemple, les verres et les liquides jaunes sous une petite épaisseur deviennent rouges lorsque l'épaisseur est très-grande, une dissolution de chlorure de chrome passe par l'augmentation d'épaisseur du vert au rouge. Pour expliquer ce phénomène, il suffit d'admettre que les corps qui prennent successivement deux teintes différentes laissent passer ces rayons en plus grande proportion que tous les autres, et que les coefficients de transmission sont en sens contraire des intensités de ces rayons dans la lumière blanche; par exemple, pour les corps jaunes qui deviennent rouges sous une grande épaisseur, il faut admettre que, si i et a, i' et a', représentent les quantités analogues pour les rayons jaunes et les rayons rouges, on a $i > i'$ et $a < a'$: alors les rayons jaunes pourront être dominants pour les petites épaisseurs, et à une certaine limite ce seront les rayons rouges.

1305. L'hypothèse que nous venons d'exposer, et qui est connue depuis longtemps, est identique avec la théorie de la propagation de la chaleur rayonnante à laquelle M. Biot a été conduit par la comparaison des résultats des expériences de M. Melloni [481] : ainsi, en conservant la même notation, nous aurons pour l'intensité du faisceau émergent exactement la même formule.

En parlant du calorique rayonnant nous avons admis que le pouvoir réflécteur sous l'incidence perpendiculaire étaient le même pour tous les corps diathermanes et pour tous les rayons, attendu que les expériences n'ont donné que des différences trop petites pour ne pas être attribuées aux erreurs des expériences mêmes. Mais pour la lumière, il est bien démontré, ainsi que nous le verrons plus loin, que l'intensité du rayon réfléchi sous l'incidence perpendiculaire est égale à l'intensité du rayon incident multipliée par le carré du rapport de $n - 1$ à $n + 1$, n étant l'indice de réfraction de ce rayon : ainsi l'intensité du rayon réfléchi varie d'un rayon à un autre, à la vérité dans des limites peu étendues pour un même corps, mais qui sont différentes pour

les différents corps; alors la formule générale de l'intensité du rayon émergent qui a traversé perpendiculairement un certain nombre de lames à faces parallèles, est

$$\Sigma(1-R)(1-R')ia^e, \quad \text{ou } \Sigma\left[1-\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right]^2 ia^e;$$

il est même très-probable qu'il en est ainsi pour le calorique rayonnant.

1306. L'analogie déjà si remarquable entre la lumière et le calorique rayonnant le devient encore davantage en calculant la quantité de lumière émergente à travers une lame de verre dont l'indice est 3/2 : on trouve 0,921, le même chiffre qui représente la quantité de chaleur émise après les deux réflexions à la première et à la deuxième surface.

1307. Lorsqu'on augmente l'épaisseur d'un verre coloré, on diminue toujours davantage le nombre des rayons de différentes teintes qui le traversent; mais on peut obtenir plus facilement des teintes parfaitement homogènes en employant plusieurs verres. Par exemple, un verre bleu d'azur et un verre rouge d'une couleur pleine ne laissent passer que le rouge extrême; en ajoutant à ces deux verres un verre vert, on obtient une opacité complète.

1308. Lorsqu'on place un verre coloré dans un faisceau de rayons solaires qui sort d'un prisme de verre blanc, et qu'on met l'œil derrière le verre, on n'aperçoit qu'un certain nombre de teintes séparées par des bandes noires, correspondantes aux rayons absorbés par le verre.

1309. Il existe un grand nombre de cristaux qui jouissent de la singulière propriété d'absorber inégalement la lumière, ou d'avoir des teintes différentes dans différentes directions. Nous reviendrons plus tard sur cet objet.

1310. L'absorption inégale des rayons de différentes couleurs par les corps, fournit une explication très-probable des couleurs des corps, en admettant qu'une partie de la lumière qu'ils réfléchissent a pénétré à une certaine profondeur très-petite, mais suffisante pour que l'inégalité d'absorption ait donné aux rayons réfléchis une certaine teinte. D'après ce que nous avons dit précédemment sur la transparence des corps opaques, quand ils sont réduits en lames très-minces, cette explication leur est applicable, comme aux corps transparents.

La lumière des corps opaques renferme toujours une certaine quantité de lumière blanche, qu'on peut diminuer à volonté, en lui faisant éprouver une série de réflexions successives sur les mêmes corps. Par exemple, en plaçant deux lames de cuivre paral-

lèlement, et recevant la lumière après un nombre croissant de réflexions, elle prend une teinte pourpre de plus en plus foncée.

§ 2. *De la vision.*

1311. *Structure de l'œil.* L'organe de la vision chez l'homme consiste en un globe ovoïde, environné d'un coussin de graisse, et logé dans une cavité osseuse du crâne. Les paupières sont destinées à le recouvrir d'une couche liquide qui se renouvelle à mesure que l'évaporation la fait disparaître; les cils qui bordent les paupières, s'opposent à l'introduction des poussières qui blesseraient l'œil ou terniraient sa surface; les sourcils, qui couronnent l'orbite, sont destinés à détourner la sueur qui s'écoule souvent du front. Le globe de l'œil est formé d'une enveloppe extérieure, blanche et opaque dans la partie postérieure, et transparente dans la partie antérieure : la partie opaque AEDFB (fig. 791) porte le nom de *sclérotique* ou de *cornée opaque;* l'autre partie AB porte le nom de *cornée transparente.* La cornée opaque est recouverte intérieurement d'une membrane désignée sous le nom de *choroïde;* elle est enduite d'une liqueur noire d'une teinte très-foncée. Le nerf optique pénètre dans l'œil à côté de l'axe vers le nez, et s'épanouit au fond de l'œil sur la choroïde en une membrane mince d'un gris blanchâtre, qu'on nomme *rétine.* La rétine est percée, dans la direction de l'axe de l'œil, d'un très-petit orifice, qui laisse la choroïde à nu. Derrière la cornée transparente se trouve une bande circulaire opaque, de couleur variable, désignée sous le nom d'*iris;* elle est percée d'une ouverture circulaire qui porte le nom de *pupille;* l'ouverture de la pupille peut se contracter et se dilater. Derrière la pupille est placé un corps lenticulaire CC′, d'une matière solide et transparente, désigné sous le nom de *cristallin;* il paraît immobile. Enfin, l'espace compris entre la cornée transparente et le cristallin est rempli d'une liqueur désignée sous le nom d'*humeur aqueuse,* et l'espace compris entre le cristallin et le fond de l'œil est occupé par une matière gélatineuse qui porte le nom d'*humeur vitrée;* ces deux humeurs sont d'une transparence parfaite.

1312. *Marche des rayons dans l'œil.* Les rayons qui viennent frapper la cornée transparente la traversent en se rapprochant; les rayons d'une trop grande obliquité sont rejetés par l'iris; ceux qui sont admis par la pupille se rapprochent encore en traversant le cristallin, et vont former sur la rétine une image renversée des

objets extérieurs. Ces images peuvent être facilement observées en prenant un œil de bœuf, extrait peu de temps après la mort : amincissant postérieurement la sclérotique, et la plaçant entre l'œil et un objet éclairé, on aperçoit par transparence l'image renversée du corps éclairé. L'expérience peut être faite d'une manière plus simple sur les yeux des animaux albinos : car, la liqueur noire de la choroïde n'existant pas, et la sclérotique étant transparente, on aperçoit immédiatement l'image.

On pense généralement que c'est l'image formée sur la rétine qui est la cause de la sensation ; mais il existe plusieurs faits difficilement conciliables avec cette supposition. 1° Lorsque l'image se forme sur la base du nerf optique, elle n'est point perceptible ; 2° quand l'image se forme dans l'axe même de l'œil, c'est alors que la sensation est la plus nette ; et cependant l'image, si elle est très-petite, correspond à l'orifice de la rétine, et se fait alors sur la choroïde. Il paraîtrait, d'après cela, que l'image se forme sur la choroïde, et que cette membrane, modifiée d'une certaine manière, agit ensuite sur la rétine ; la structure de l'œil de la sèche rend cette dernière hypothèse bien plus probable encore. Chez ce mollusque un enduit membraneux est interposé entre la rétine et l'humeur vitrée, de manière que les images ne peuvent pas se former sur la rétine, mais seulement sur la membrane qui la recouvre. Pour reconnaître qu'un objet disparaît quand son image se forme sur la base du nerf optique, il faut placer sur une feuille de papier trois taches circulaires sur la même ligne horizontale, et éloignées de 5 centimètres. On ferme un œil, on regarde la tache centrale, et on s'éloigne, de manière que l'axe de l'œil soit perpendiculaire au papier, à une distance de 25 à 35 centimètres : l'image de l'objet le plus éloigné du nez disparaît, tandis que celles des deux autres restent toujours visibles.

Nous rapporterons un phénomène assez remarquable, qui se déduit bien facilement de la marche des rayons dans l'œil. Lorsqu'on place très-près de l'œil une carte percée d'un petit trou, et entre l'œil et le trou une tête d'épingle, on aperçoit l'ombre renversée de l'épingle. Cet effet résulte de ce que la lumière émanée du trou projette sur la rétine l'ombre droite de l'épingle, attendu que pour cette distance le foyer est derrière la rétine : alors l'objet paraît renversé.

1313. Les images que l'on obtient au moyen des lentilles ordinaires ont deux imperfections, qui n'existent point dans les images

qui se forment sur la rétine : l'une résulte de ce que les bords des lentilles ne concentrent pas les rayons rigoureusement au même foyer que ceux qui sont voisins du centre : on la désigne sous le nom d'*aberration de sphéricité;* l'autre provient de ce que les rayons de différentes couleurs, ayant des réfrangibilités différentes, forment des foyers distincts : elle est connue sous le nom d'*aberration de réfrangibilité.* De la première, il résulte que les images doivent être un peu diffuses; et de la seconde, qu'elles doivent être terminées par des franges irisées, à cause des différences de position des images de différentes couleurs : il faut donc que les parties de l'œil soient disposées de manière à faire disparaître ces aberrations. On admet assez généralement que l'aberration de sphéricité est en grande partie compensée par l'iris qui intercepte les rayons trop obliques, par la structure du cristallin, qui fait converger sensiblement au même point les rayons qui le traversent, et enfin par la courbure de la rétine. Quant à l'aberration de réfrangibilité, on peut comprendre qu'elle soit sensiblement nulle, par cela seul, que les rayons parcourent des chemins trop petits pour que les objets soient terminés par des franges colorées d'une étendue appréciable.

1314. *Distance de la vision distincte.* L'œil perçoit des images distinctes à toutes les distances; mais les objets doivent être d'autant plus grands qu'ils sont plus éloignés, parce qu'alors le défaut de netteté des contours ne déforme pas sensiblement les images. Mais quand les objets ont de petites dimensions, comme les caractères d'un livre, ils ne peuvent être vus qu'à une distance déterminée, ou du moins quand leur distance est comprise entre certaines limites : cette distance porte le nom de *distance de la vision distincte.* On peut facilement reconnaître et mesurer cette distance en prenant une règle noire de $0^m,80$ de longueur, au milieu de laquelle on a tendu un fil de soie très-blanche : en plaçant l'œil vers l'extrémité de la règle et un peu au-dessus, le fil semble terminé par deux lignes qui se croisent. C'est au point de croisement que la vision est distincte : souvent le fil paraît d'un diamètre constant dans une certaine étendue qui fixe alors les limites de la vision distincte. La distance de la vision distincte pour les très-petits objets est d'environ 25 à 35 centimètres.

On sait que, quand une lentille forme une image derrière elle, la distance de l'image à la lentille varie avec celle de l'objet à la lentille : ainsi, l'image qui se forme derrière le cristallin se trouve à des

distances variables avec la distance de l'objet; et cependant, pour que la vision soit nette, il semble que cette image doit se former sur la rétine. Un grand nombre d'hypothèses ont été proposées pour expliquer la netteté de la vision des objets placés à des distances très-différentes. On a supposé d'abord que le globe de l'œil s'aplatissait quand les objets s'éloignaient; mais l'étendue du mouvement qu'il devrait éprouver a fait renoncer à cette hypothèse. On a supposé ensuite que c'était la cornée transparente qui s'aplatissait; mais les images observées par réflexion sur cette membrane, lorsqu'on voit de près et de loin, n'éprouvant pas de variations, cette hypothèse a encore été rejetée. La supposition que le cristallin éprouvait des variations de courbure n'a pas eu un meilleur succès, car les personnes chez lesquelles le cristallin a disparu par suite de l'opération de la cataracte voient distinctement à différentes distances au moyen d'un seul verre lenticulaire. On a prétendu que la cause de la variation de la vision distincte provenait uniquement de la variation de l'ouverture de la pupille : la pupille s'ouvre pour les objets éloignés, et se resserre pour les objets voisins. Le cristallin étant formé de couches concentriques, de densités et de courbures décroissantes à partir du centre, on admettait que les rayons qui traversaient le cristallin près du centre étaient plus convergents que ceux qui le traversaient près des bords; c'est le contraire dans les lentilles homogènes. Alors, lorsqu'un objet était placé près de l'œil, la pupille se fermait pour n'admettre que les rayons les plus convergents, les autres ayant leurs foyers au delà de la rétine; et quand l'objet était très-éloigné, la pupille s'ouvrait pour admettre les rayons qui traversaient le cristallin près des bords, et qui venaient converger sur la rétine; et on disait que les rayons plus voisins du centre, ayant leur foyer en avant de la rétine, ne produisaient sur elle qu'un effet insensible à cause de leur divergence et de leur plus faible intensité. Cette hypothèse était appuyée sur ce fait, qu'on peut voir des objets placés très-près de l'œil en les observant à travers un petit trou; mais une objection décisive renverse complétement cette hypothèse : on voit aussi nettement des objets très-éloignés en les regardant à travers un trou d'épingle percé dans une carte qu'à l'œil nu. Enfin, on a pensé que la netteté de la vision à différentes distances provenait non pas de ce que le foyer était toujours sur la rétine, mais de ce que la variation qu'éprouvait la distance focale était assez petite pour que l'image conservât une netteté suffisante, et on a appuyé cette hypothèse

sur ce qui se passe dans les lentilles ordinaires lorsque l'image est reçue sur un écran : une petite variation dans la position de l'écran, l'objet restant immobile, ou une variation dans la position de l'objet, l'écran restant fixe, ne change pas sensiblement la netteté de l'image.

De toutes ces recherches sur l'explication de la vision distincte à différentes distances, il reste des faits bien acquis et des explications plus ou moins inadmissibles. Ces faits sont : l'invariabilité de la forme de la surface de la cornée transparente, constatée par le docteur Yong et par des expériences récentes de M. Haldat, et l'impossibilité du déplacement du cristallin.

D'après des expériences très-précises, M. Chossat a constaté que la surface de la cornée transparente, les surfaces antérieures et postérieures du cristallin, sont des surfaces de révolution ellipsoïdales, mais dont les axes de révolution ne coïncident pas. Il résulte aussi des expériences de M. de Haldat qu'un cristallin isolé et employé comme objectif d'une chambre obscure, possède à ui seul la faculté de réunir au même foyer les rayons émanés d'objets placés à 3 ou 4 décimètres, et à 20 ou 30 mètres. Ainsi, c'est dans la structure seule du cristallin que réside la cause de l'effet singulier dont il est question.

M. Sturm a trouvé la solution de la question dans le défaut de parallélisme des axes des surfaces du cristallin et de la cornée transparente, et dans un principe démontré d'abord par Malus pour une seule réfraction, et ensuite par M. Dupin pour un nombre quelconque. Voici l'énoncé de ce principe (nous ne pouvons mieux faire que de rapporter les propres expressions de M. Sturm) : « Lorsque des rayons partant d'un point lumineux éprouvent des réfractions en traversant différents milieux séparés par des surfaces quelconques, ces rayons, après leur dernière réfraction, sont toujours normaux à une certaine surface (et par conséquent aussi à une suite de surfaces, dont deux quelconques interceptent sur tous les rayons une même longueur).

« En partant de ce principe, auquel on est aussi conduit par la théorie des ondulations, on peut étudier la forme qu'affecte, après la dernière réfraction, un faisceau très-mince de rayons qui traversent un diaphragme d'une très-petite ouverture, ayant son plan perpendiculaire au rayon qui passe par son centre. (Sur la fig. 1020, où les dimensions sont fort exagérées, ce diaphragme a la forme d'un cercle.)

« Voici les résultats qu'on déduit du calcul. Il y a deux plans ZOX et ZOY, perpendiculaires entre eux, qui contiennent les rayons infiniment voisins du rayon central OZ, susceptibles de le couper. Les rayons dirigés dans le plan ZOX coupent le rayon central OZ en un certain point F ; les rayons dirigés dans le plan ZOY coupent OZ en un autre point *f*. Ces deux points de rencontre F et *f* appartiennent à la surface caustique formée par les intersections successives des rayons réfractés, surface qui a, en général, deux nappes distinctes. On peut appeler ces deux points F et *f* les deux foyers du faisceau infiniment petit, dont le rayon central est OZ, et la droite F*f* l'intervalle focal de ce faisceau.

« Les deux plans ZOX, ZOY coupent le diaphragme suivant deux diamètres AOA', BOB', perpendiculaires entre eux. Menons des points A, A' au point F les droites indéfinies AF, A'F, et des points B, B' au point *f* les droites B*f*, B'*f*. Par le point *f*, menons dans le plan ZOX la droite *cfc'*, parallèle à AA', et comprise entre AF et A'F. Menons aussi par le point F dans le plan ZOY la droite CFC', parallèle à BB', et comprise entre les lignes B*f* et B'*f* prolongées. Ces deux droites *cfc'* et CFC' ont des directions perpendiculaires entre elles et à OZ.

« Cela posé, le rayon qui passe par un point M, pris dans l'intérieur ou sur le contour du diaphragme, est assujetti à rencontrer les deux droites fixes *cfc'* et CFC', d'où il suit que la surface qui termine le petit faisceau de lumière est une surface gauche engendrée par une ligne droite indéfinie, qui se meut en s'appuyant sur la circonférence du diaphragme, et sur les deux droites fixes et limitées *cc'*, CC'.

« Si l'on suppose, pour plus de simplicité, le diaphragme de forme circulaire, tout plan perpendiculaire au rayon central OZ en un point quelconque *o* différent des points F et *f*, coupe cette surface gauche ou le faisceau lumineux suivant une ellipse dont les axes *aoa*, *bob'* sont parallèles aux diamètres AA', BB' du cercle AB, et compris, le premier, entre les droites AF, A'F, le second, entre les droites B*f*, B'*f*. Mais, quand on mène un plan perpendiculaire à OZ par le point *f*, la section se réduit simplement à la droite *cfc'*, et, de même, un plan perpendiculaire à OZ au point F coupe la surface suivant l'autre droite CFC'. Ces deux droites sont deux petits traits brillants sur le papier qui reçoit le faisceau lumineux. Les longueurs de ces deux droites et leur différence, comparées au diamètre AA' du cercle AB, sont d'autant moindres que la distance O*f*

est plus grande, et que l'intervalle focal F*f* est plus petit; car on a les proportions

$$cc' : AA' :: Ff : OF, \quad CC' : AA' :: Ff : Of$$

et, par conséquent, $CC' - cc' : cc' :: Ff : Of$.

« Quand le plan perpendiculaire à OZ, sur lequel tombe la lumière, se meut en s'éloignant du diaphragme AB, les sections qu'il fait dans le faisceau lumineux, ou les portions éclairées, sont une suite d'ellipses dont les deux axes *aa'*, *bb'* diminuent ensemble, mais non dans le même rapport, jusqu'à ce que le plan mobile vienne passer par le foyer *f* le plus rapproché du diaphragme. Alors l'axe parallèle à AA' est *cc'*, et l'autre axe devient nul, de sorte que l'ellipse se réduit à la droite *cc'*. Le plan continuant à s'éloigner du diaphragme, l'axe *aa'*, parallèle à AA', continue à décroître; l'autre axe *bb'*, qui s'était évanoui, commence à croître; la section devient un cercle, lorsque les distances du plan coupant aux deux foyers F et *f* sont entre elles comme les distances du diaphragme circulaire O à ces mêmes foyers; d'où il suit que, lorsque l'intervalle focal F*f* est une petite fraction de la distance O*f*, cette section circulaire est à très-peu près au milieu de l'intervalle F*f*, mais toujours plus près de *f* que de F. Le plan passant au delà de cette position, l'axe *aa'* continue à diminuer, et *bb'* à augmenter; de sorte que *bb'*, qui était jusqu'ici le petit axe, devient maintenant le grand axe. Au point F, la section se réduit à la droite CFC'; car l'axe *aa'* devient nul, et *bb'* égal à CC'. Au delà du point F, les sections sont des ellipses dont les axes augmentent à la fois indéfiniment.

« L'aire d'une section quelconque, ou la portion éclairée, est proportionnelle au rectangle des distances de son plan aux deux points F et *f*; cette aire est donc la plus grande au milieu de l'intervalle focal F*f*.

« On voit par là que le faisceau lumineux est beaucoup plus condensé autour de l'intervalle focal F*f*, et même un peu en deçà et au delà, que partout ailleurs : car, près des points F et *f*, s'il est dilaté dans un sens, il est rétréci dans un autre, d'où résulte une sorte de compensation. Le faisceau ne deviendrait exactement ou sensiblement conique qu'autant que les deux foyers F et *f* coïncideraient ou seraient extrêmement rapprochés l'un de l'autre. C'est un cas exceptionnel, qui ne peut arriver que dans des conditions très-particulières.

« Toutes les circonstances que je viens de décrire se vérifient par des expériences faciles.

« Il suffit, par exemple, de faire passer dans une chambre noire, à travers un très-petit trou percé dans un écran, un faisceau de lumière homogène qui tombe sur un sphéroïde de verre, ou sur une petite fiole contenant un liquide, et offrant une surface courbe irrégulière, dont on couvre la partie postérieure avec un papier percé d'un petit trou d'une forme arbitraire. Les rayons qui sortent par cette petite ouverture, après être entrés par celle de l'écran, sont ceux qui émanent d'une particule du corps lumineux assez petite pour pouvoir être considérée comme un simple point. En recevant dans l'obscurité le faisceau émergent sur une feuille de papier blanc qu'on éloignera graduellement, on reconnaîtra la forme des différentes sections, et particulièrement les deux petits traits lumineux plus ou moins distants l'un de l'autre et dont les directions sont perpendiculaires entre elles. C'est dans l'intervalle focal compris entre ces deux traits que la lumière est plus concentrée et plus vive. On peut voir aussi la forme de tout le faisceau lumineux émergent, en produisant au-dessous une fumée épaisse, dans laquelle ce faisceau apparaît dans toute son étendue. Sa forme variera sans perdre ses caractères généraux, si l'on approche ou si l'on éloigne de l'écran le corps lumineux ou le corps réfringent.

« Le fait que je viens de décrire en détail me paraît applicable à la théorie de la vision.

« On a admis généralement que, pour avoir la vision distincte d'un point lumineux, il fallait que les rayons émanés de ce point vinssent converger, ou *former leur foyer* sur la rétine, ou du moins très-près de la rétine. Mais les considérations qui précèdent prouvent, ce me semble, qu'il n'y a pas un point de convergence unique. Ce qui existe toujours dans un faisceau très-mince qui a pénétré dans l'humeur vitrée, et qui vient rencontrer la rétine, c'est ce que j'ai appelé plus haut *l'intervalle focal* F*f*, qui peut être plus ou moins long. Cet intervalle ne peut pas être absolument nul dans l'œil, car l'œil offre un assemblage de différents milieux inégalement réfrangibles (au nombre de trois au moins en négligeant la cornée); et ces milieux sont séparés par des surfaces qui ne sont pas rigoureusement sphériques ni même symétriques par rapport à un axe commun. . . . . .

« D'après tous ces faits, il paraît peu probable que les deux foyers F et *f* du petit faisceau lumineux qui, après plusieurs réfractions,

a pénétré dans l'humeur vitrée, se confondent en un seul, comme si les rayons avaient traversé des lentilles artificielles bien centrées et homogènes. Je pense donc que dans l'œil l'intervalle focal F*f*, propre à chaque faisceau provenant d'un point extérieur, est non pas nul, mais seulement très-petit, de 1 ou 2 millimètres au plus. J'admets, selon l'opinion générale des physiologistes, que c'est la rétine seule qui reçoit l'impression de la lumière (ou selon Mariotte et Brewster, l'enveloppe choroïde qui se trouve immédiatement au-dessous de la rétine, celle-ci étant transparente). La direction du rayon central sur laquelle se trouvent les foyers F et *f* étant presque perpendiculaire à la surface de la rétine, le point d'où émanent les rayons lumineux sera vu avec une netteté suffisante, si la ligne F*f*, quoique très-courte, rencontre la rétine en un point situé entre les deux foyers F et *f*, ou même encore un peu au delà de F, ou en deçà de *f* : car alors le mince faisceau lumineux que la pupille a laissé passer, interceptera sur la surface de la rétine un espace extrêmement petit, incomparablement moindre que les sections faites dans ce faisceau très-près du cristallin. A la vérité, l'image d'un simple point sur la rétine peut être alors plus étendue en longueur qu'en largeur ; mais, comme la lumière est plus condensée au centre de cette image et que ses deux dimensions, quoique inégales, sont d'une extrême petitesse, on conçoit que si l'on regarde un objet d'une étendue finie, des points contigus de cet objet donneront sur la rétine des images qui se superposeront en partie dans le sens de leurs longueurs, de manière à former par leur ensemble une image de l'objet assez nette et bien terminée.

« On explique par là comment la distance d'un objet à l'œil peut varier entre certaines limites, sans que les images sur la rétine des différents points de cet objet grandissent, jusqu'à se confondre, en s'étendant et empiétant trop les uns sur les autres, ce qui troublerait la vision.

« Si l'objet se rapproche ou s'éloigne, le petit faisceau de lumière qui, émané d'un point de cet objet, traverse l'œil, changera de forme graduellement ; ses deux foyers F et *f* au fond de l'œil se déplaceront simultanément en marchant dans le même sens, et restant toujours très-près l'un de l'autre, et il suffira que l'un deux se trouve encore assez près de la rétine pour que l'image n'occupe toujours qu'un très-petit espace sur la rétine, et que la vision ne cesse pas d'être distincte. D'autres circonstances peuvent d'ailleurs contribuer à la petitesse de l'image ; savoir : la contraction de l'iris,

le déplacement imperceptible de la tête lorsque l'œil se fixe sur l'objet, ou se dirige d'un objet vers un autre, ce qui change un peu les incidences des rayons, et peut-être aussi un très-léger changement de courbure du cristallin.

« Quand l'objet sera trop rapproché ou éloigné, la vue pourra devenir confuse, parce que les deux foyers F et *f*, correspondants à chaque point de l'objet, se trouveront trop loin de la rétine, ou bien encore trop distants l'un de l'autre. Un œil qui aura le défaut de donner, pour les distances ordinaires, un intervalle focal F*f* trop en avant ou en arrière de la rétine, sera myope ou presbyte; ce qui arrivera si la convexité de la cornée ou du cristallin est trop forte ou trop faible. » (*Comptes rendus*, n°s 9 et 11, 1845.)

1315. *Sensation de la lumière.* Tout ce que nous savons sur la vision, se borne à ce qu'il se forme sur la rétine une image renversée des objets extérieurs. Mais cette image n'est que la cause de la sensation; la modification quelconque qu'éprouve la rétine se transmet au cerveau par le nerf optique, et c'est là que se produit la sensation. Lorsqu'on regarde avec un œil, l'objet est vu dans la direction du cône de lumière incident, et à la distance du sommet de ce cône. Quand on regarde avec les deux yeux, l'estimation de la distance se fait principalement par l'angle de leurs axes : aussi, dans ce cas, l'appréciation de la distance est beaucoup plus exacte; mais elle cesse de l'être quand l'objet est très-éloigné, parce qu'alors les axes sont presque parallèles. Quant au jugement que nous portons sur la grandeur absolue des corps, il résulte de leur diamètre apparent, c'est-à-dire de l'angle formé par les rayons qui partent de leurs extrémités, et de l'idée de leur distance. Lorsqu'on fixe l'œil successivement sur deux objets qui restent dans le champ de la vision, les objets ne changent pas de place; il résulte de là que l'œil tourne autour du centre optique.

On conçoit facilement que, quoique les images formées au fond de l'œil soient renversées, nous voyons les objets droits : car chaque point est vu dans la direction de la ligne qui passe par ce point et le centre optique, et ce centre est en avant de la rétine.

Les deux images qui se forment dans les deux yeux ne donnent qu'une seule sensation, parce que les nerfs optiques se réunissent en pénétrant dans le cerveau; mais il faut cependant que les images soient placées sur des points correspondants des deux rétines : autrement elles deviennent distinctes toutes deux. C'est ce que l'on peut facilement vérifier en pressant un œil avec le doigt pour le dé-

ranger de sa position. Cette explication suppose que les images formées sur les rétines sont égales, mais il n'en est ainsi qu'autant que l'objet est plan; quand il est en relief les deux images diffèrent et d'autant plus qu'il est plus rapproché, car chacune d'elles est la projection conique de l'objet sur un plan perpendiculaire à l'axe optique. Ainsi, il y a entre les images formées sur la rétine et la perception des objets une relation intime; mais on n'a pas même essayé de donner une explication. M. Wheatstone a fait sur ce sujet un travail très-remarquable (*A. C. et P.*, t. XXIX).

1316. *Durée de la sensation.* La sensation de la lumière n'est point instantanée; elle a une certaine durée : on le démontre par une expérience bien simple. Lorsqu'on fait tourner rapidement un charbon incandescent fixé à l'extrémité d'une tige, on aperçoit une bande lumineuse continue. On pourrait même se servir de cet appareil pour mesurer la durée de la sensation, ou du moins le temps pendant lequel la sensation reste sensiblement constante : il suffirait de faire varier la vitesse de rotation, jusqu'à ce qu'on aperçût un cercle complet d'une teinte uniforme. La mesure de la durée de la sensation peut s'effectuer d'une manière plus exacte au moyen de l'appareil suivant, dû à Aimé. Imaginons deux cercles de carton montés sur le même axe, et se mouvant en sens contraire avec des vitesses égales; supposons que le premier soit percé d'un grand nombre d'ouvertures égales et également espacées, et que le second soit percé d'un seul orifice : si, l'œil étant placé sur l'axe de rotation, l'appareil reçoit un large faisceau de lumière parallèle à l'axe de rotation, la rotation étant d'abord très-lente, l'orifice unique du cercle qui se trouve en avant paraîtra éclairé aux époques des coïncidences avec les orifices du premier cercle; mais, quand la vitesse aura dépassé une certaine limite, la première apparition subsistera avec la suivante, ou les deux suivantes, si la durée de la sensation est égale à l'intervalle de temps qui sépare deux apparitions, ou au double de cet intervalle. Ainsi, quand on aura obtenu un nombre quelconque d'apparitions simultanées, les vitesses de rotation et le nombre des orifices du premier disque conduiront facilement à une valeur approximative de la durée de la sensation. M. Plateau a trouvé par différentes méthodes : 1° que la durée totale des impressions sur la rétine était sensiblement la même pour les différentes couleurs, et approximativement de 0", 34; 2° qu'il faut un temps appréciable pour que l'impression sur la rétine soit complète; 3° que la durée pendant laquelle l'impression conserve

sensiblement la même intensité est d'autant plus grande que l'impression est plus faible; 4° que ce temps, pour un papier blanc éclairé par la lumière du jour, est moindre que 0",008; qu'il est plus grand pour un papier rouge, et plus grand encore pour un papier bleu; 5° que la durée totale est d'autant plus grande que l'impression a été plus intense; qu'elle est d'autant plus grande qu'on a regardé l'objet pendant un temps plus court, pourvu que ce temps ait été suffisant pour développer une impression complète; 6° que quand l'objet est très-lumineux, et qu'après l'avoir contemplé quelque temps, on se couvre subitement les yeux, l'impression disparaît et reparaît plusieurs fois avec des teintes complémentaires.

Nous décrirons plusieurs phénomènes curieux qui dépendent de la persistance des impressions sur la rétine.

1317. Imaginons qu'une roue garnie de plusieurs rais noirs ou seulement obscurs, tourne avec une grande vitesse autour de son axe sur un fond blanc : on apercevra une teinte uniforme dans chaque circonférence concentrique à l'axe de rotation, et qui résulte d'un mélange de blanc et de la teinte des rais. Si, par exemple, chaque rais était formé par deux rayons, en désignant par m le nombre des degrés occupés par la somme des rais, la teinte résulterait d'un mélange de blanc et de la couleur des rais dans le rapport de $360° - m$ à m. Si plusieurs roues placées sur le même axe tournaient avec la même vitesse, l'effet serait encore le même, seulement la teinte serait plus foncée; mais si les vitesses étaient différentes, les rais se rencontreraient périodiquement, et si ces coïncidences se manifestaient toujours dans les mêmes lieux et à des intervalles plus petits que la durée de la sensation, on verrait une roue fixe d'une teinte plus claire que le fond, dont les rais seraient les lieux des coïncidences : car pour tous les lieux de coïncidence, la teinte se compose de celle du fond et de la teinte d'un seul rais, tandis que pour tous les autres points elle se compose de celle du fond et de celles de deux rais; et si les lieux de coïncidence se déplaçaient successivement d'une petite quantité, la roue paraîtrait avoir un mouvement de rotation. On conçoit facilement d'après cela que, si les roues n'étaient pas placées sur le même axe, il se produirait des images fixes ou mobiles de formes très-variées.

1318. Concevons un cercle de carton mobile autour de son centre, et percé près de la circonférence d'un certain nombre de trous

également espacés, et au-dessous de chacun d'eux, des figures représentant les différentes phases successives du mouvement d'un même objet, divisé en autant de parties qu'il y a de trous. Si on place le carton devant un miroir, et si on lui imprime un mouvement de rotation rapide, en regardant dans la glace au delà du carton, on ne distingue aucune figure, on voit seulement des cercles colorés concentriques; mais, si l'on regarde dans la glace à travers les trous du carton, on voit une image distincte, et chaque figure paraît animée du mouvement dont l'ensemble des figures présente les différentes phases. On en concevra facilement la raison, en remarquant que l'image du carton, dans une des positions qu'il prend successivement, est visible pendant la durée du passage devant l'œil de l'intervalle qui sépare deux trous : par conséquent, si le mouvement est assez lent pour que cette durée soit sensiblement celle de la sensation, les images correspondantes aux phases successives du mouvement de la figure, se succéderont dans le même lieu, et produiront la même apparence que si la figure se mouvait elle-même. Cette jolie expérience est due à M. Plateau.

1319. Nous pouvons maintenant comprendre l'appareil employé par M. Savart pour reconnaître la constitution des veines liquides [240]. Imaginons que de petits globules, partent d'un même point, à des intervalles de temps égaux très-petits, et changent de forme dans leur chute, de la même manière, à des distances périodiques égales entre elles : il est facile de voir que, si le temps qu'un des globules met à parcourir une distance égale à celle qui sépare deux globules successifs est plus petite que la durée de la sensation, l'œil apercevra une surface continue qui sera la surface-enveloppe d'un seul globule dans toutes les positions qu'il occupe successivement. Supposons maintenant que derrière la veine, formée par un liquide opaque, on place une bande noire annulaire, verticale, mobile sur deux rouleaux et sur laquelle on ait tracé des lignes blanches horizontales également espacées, si on donne à la bande noire un mouvement vertical de bas en haut, par la rotation des rouleaux, tel que la vitesse soit à celle des globules dans le rapport de l'écartement des raies à celle des globules, il est évident que les raies et les globules arriveront en même temps à des hauteurs éloignées les uns des autres de la distance des globules; et, comme les coïncidences se succéderont à des intervalles très-petits, il en résultera une sensation continue, et chacune des images distinctes sera un rectangle ayant pour largeur celle du globule, et

une longueur constante dépendant uniquement de la largeur des raies, et des vitesses des globules et des raies. On pourra alors apprécier les variations de forme des globules, car on obtiendra les largeurs des globules à certaines hauteurs, et l'on en déduira facilement le diamètre vertical, attendu que leur volume reste constant. Cette expérience suppose cependant qu'on donne aux raies une certaine vitesse, dépendant de l'écartement des globules et des raies, et de la vitesse des premières, vitesse qu'il serait impossible de calculer, mais qu'on obtient facilement par tâtonnement : car la vitesse en question est la seule qui donne des coïncidences à des hauteurs constantes, et pour laquelle les images aient des dimensions fixes. M. Matteucci a indiqué récemment une méthode beaucoup plus simple pour reconnaître la forme des gouttes du liquide : elle consiste à les éclairer par des étincelles électriques; on les aperçoit comme si elles étaient immobiles.

1320. *Images accidentelles.* Si l'on regarde fixement un objet éclairé placé sur un fond noir, en tenant les yeux constamment attachés sur le même point, et si ensuite on les porte subitement sur une surface blanche, ou si l'on ferme les yeux en les couvrant avec un mouchoir, on voit une image de l'objet, mais d'une couleur complémentaire : c'est cette image qu'on désigne sous le nom d'*image accidentelle.* L'image accidentelle d'un objet rouge est verte, celle d'un objet jaune est bleue. La durée de l'image accidentelle est d'autant plus grande que l'objet a été regardé plus longtemps.

La disparition des images accidentelles n'a pas lieu en général par un décroissement d'intensité graduel et continu; elle présente, au contraire, ordinairement des variations périodiques d'intensité; quelquefois même on voit reparaître l'impression primitive. Pour observer ces phénomènes, on prend un tube noirci, d'environ $0^m,50$ de longueur, et de $0^m,03$ de diamètre; on regarde fixement à travers ce tube, pendant une minute au moins, un papier rouge bien éclairé et suffisamment étendu pour que les bords en soient cachés par le tube; ensuite, sans découvrir l'œil fermé, on regarde le plafond blanc de l'appartement : on voit d'abord une image circulaire verte, qui est ensuite remplacée par une image rouge d'une faible intensité et d'une courte durée, après quoi revient une image verte, puis une nouvelle image rouge. Ces alternatives se succèdent jusqu'à quatre fois, mais les intensités des images vont continuellement en s'affaiblissant (M. Plateau).

Les couleurs accidentelles se combinent entre elles de la même manière que les couleurs réelles. En effet, si on place l'un à côté de l'autre, sur un fond noir, deux petits carrés de papier coloré, l'un violet, l'autre orangé, couleurs dont les accidentelles sont le jaune et le bleu, si l'on marque d'un point noir le milieu de chacun des carrés, et qu'après avoir fixé alternativement les yeux sur chacun d'eux, pendant au moins une seconde et à plusieurs reprises, on ferme les yeux, ou bien qu'on les dirige sur une surface blanche, on distingue trois carrés juxtaposés : les deux extrêmes sont bleu et jaune et celui du milieu est vert. Mais quand les deux couleurs primitives sont complémentaires, les deux teintes accidentelles par leur superposition produisent du noir.

Les couleurs accidentelles se combinent avec les couleurs réelles comme ces dernières entre elles : c'est ce qu'on peut facilement reconnaître en projetant l'image accidentelle sur un fond coloré; mais quand les images accidentelles se mêlent avec des images directes complémentaires, l'effet résultant est d'un gris plus ou moins foncé.

Les phénomènes que nous venons de décrire succèdent à la vision directe de l'objet; mais pendant sa contemplation même il se produit des phénomènes analogues.

Supposons que sur une feuille de papier blanc on ait tracé quatre rectangles égaux A, B, C, D, le second et le troisième ayant un côté commun, le premier et le quatrième éloignés des deux autres, et supposons qu'une même teinte uniforme d'encre de Chine ait été placée sur les rectangles A et B, et que les rectangles C et D aient été recouverts d'une teinte plus foncée, uniforme, et la même pour tous les deux. En fixant ces rectangles, la teinte de A paraît plus foncée que celle de B, et celle de C paraît aussi plus foncée que celle de D; ainsi les deux teintes voisines s'influencent mutuellement pour augmenter la teinte la plus sombre et pour éclaircir l'autre. Cette influence se manifeste principalement dans les parties voisines de la ligne de contact. Si on trace une suite de rectangles A, B, C, D, E, F, G, etc., égaux et contigus, et si on les recouvre de teintes plates à l'encre de Chine d'une intensité croissante, les teintes paraîtront plus foncées à droite de chaque ligne de séparation, plus claire de l'autre, et la figure semblera cannelée.

Si l'on regarde fixement un carré de papier rouge sur un fond blanc, on voit après un certain temps une auréole verte qui s'étend

à une certaine distance. Si l'on place entre une fenêtre et l'œil un papier coloré transparent, et si l'on applique sur ce papier une petite bande de carton blanc, elle paraît colorée d'une couleur complémentaire. Les ombres produites sur un mur blanc au lever et au coucher du soleil paraissent bleues ou vertes, à cause de la teinte rougeâtre de la lumière. On conçoit facilement, d'après cela, l'influence réciproque des couleurs voisines : chacune d'elles produisant sur l'autre une teinte complémentaire à la sienne, les teintes s'aviveront mutuellement quand elles seront complémentaires, et dans le cas contraire elles se modifieront.

On observe quelquefois, au delà de l'espace occupé par l'auréole accidentelle d'une teinte complémentaire à celle de l'objet, une faible nuance de la teinte de l'objet. M. Chevreul a fait une étude spéciale de ces phénomènes dans un ouvrage intitulé *De la loi du contraste simultané des couleurs, et de l'assortiment des objets colorés, etc.*

Plusieurs hypothèses ont été proposées successivement pour expliquer ces phénomènes. Celle de Scherffer consistait à admettre que l'action continue des rayons d'une certaine couleur sur une partie de la rétine, en diminue momentanément la sensibilité pour les rayons de cette couleur. Cette supposition explique certains faits, mais ne rend pas compte du plus grand nombre. La seule explication généralement admise maintenant, et qui s'accorde parfaitement avec tous les faits, est due à M. Plateau. Ce physicien suppose que, quand la rétine a été ébranlée, et que la cause d'excitation a cessé, la rétine ne revient à sa position normale que par une série d'oscillations décroissantes, que les états par lesquels elle repasse successivement produisent des sensations opposées, et enfin que pendant la durée même de l'excitation, l'ébranlement de la rétine s'étend au delà des points directement ébranlés, mais en changeant de nature comme les ébranlements d'une membrane tendue. Cette explication n'est évidemment que la traduction des faits que nous avons rapportés.

1321. *Irradiation.* Lorsqu'on observe deux cercles égaux, l'un blanc sur un fond noir, l'autre noir sur un fond blanc, ils ne paraissent pas du même diamètre ; le premier paraît plus grand que le second : c'est dans ce phénomène que consiste l'irradiation. M. Plateau, dans un mémoire très-remarquable sur cet objet (*Mém. de l'Acad. royale des Sciences de Bruxelles*, t. XI), a constaté les faits suivants : 1° l'irradiation se manifeste à toute di-

stance de l'objet; 2° elle augmente avec l'éclat de l'objet et la durée de la contemplation; 3° elle varie d'un individu à un autre, et chez le même individu d'un jour à l'autre; 4° elle est augmentée par les lentilles divergentes, et diminuée par celles qui sont convergentes; 5° dans les lunettes astronomiques l'irradiation naturelle est modifiée par les verres de la lunette, qui agissent dans des sens contraires. L'irradiation provient, sans aucun doute, de ce que l'excitation produite par la lumière se propage sur la rétine un peu au delà du contour de l'image.

1322. *Des raies qu'on aperçoit à l'œil nu en regardant à travers une fente étroite, placée à une distance de l'œil plus petite que la distance de la vision distincte.* Ces raies, qu'on aperçoit facilement en regardant le ciel à travers une fente d'un demi-millimètre de largeur, sont seulement obscures, irrégulièrement distribuées dans la fente, mais toujours de la même manière, quelles que soient la grandeur, la forme et la nature du corps éclairant; elles ne changent même pas quand le corps éclairant est assez étroit pour donner des franges par diffraction; et quand on couvre une partie de la fente par un verre coloré, les raies vues à travers le verre sont sur le prolongement de celles qui se forment dans la partie libre de la fente. Ces raies changent de place et s'affaiblissent quand on augmente la largeur de la fente; au delà d'un millimètre on n'en aperçoit plus que de très-faibles, placées près des bords. Quand on éloigne la fente, les raies deviennent moins nombreuses, plus nettes, et disparaissent complétement à la distance de la vision distincte. Lorsqu'on place une fente étroite devant l'œil, et qu'on incline la fente ou la tête, les raies changent de place et de disposition. Il résulte évidemment de ces faits que les raies dont il est question se forment dans l'œil. On en explique très-bien l'origine en admettant qu'il existe dans l'organe un certain nombre de points obscurs d'un très-petit diamètre : car chaque point lumineux de la fente projettera sur la rétine une ombre de ce point et la suite des ombres formées par les différents points de la fente formera une ligne obscure qui lui sera parallèle; cette hypothèse satisfait à toutes les particularités du phénomène.

Des expériences décisives constatent d'ailleurs l'exactitude de l'explication précédente. On place entre l'œil et une fente étroite une lame de verre sur laquelle on a fait avec de l'encre de Chine un point noir très-petit, et l'on voit une raie obscure parallèle à la fente. Si l'on regarde le ciel à travers une fente étroite

dont on puisse à volonté diminuer la longueur, au moyen d'une plaque mobile dont le bord est perpendiculaire à sa direction, quand l'orifice a une longueur qui diffère peu de sa largeur, on aperçoit un champ circulaire parsemé de points obscurs, toujours disposés de la même manière par rapport à l'œil; et par l'allongement de la fente, chaque point obscur produit une raie. Quant à la nature des points obscurs de l'œil, je pense qu'ils proviennent de la structure mamelonnée de la cornée transparente ou de l'enveloppe de l'humeur aqueuse : car chaque petit mamelon se comporterait comme une lentille d'un court foyer, la lumière qui les aurait traversés se disperserait dans un cône très-ouvert, et chacun d'eux porterait sur la rétine une ombre comme un corps opaque (Péclet).

1323. *Perspective.* Un point lumineux étant vu sur l'axe du faisceau lumineux qu'il envoie à l'œil, les contours des images se trouvent sur la surface d'un cône qui a pour sommet le centre de la pupille, et qui est tangent aux bords du corps; et l'image formée sur la rétine est semblable à une section du cône perpendiculaire à son axe : ainsi, toutes les sections de ce cône, par des surfaces planes ou courbes, formeront sur la rétine des images terminées par les mêmes contours. La section de ce cône par un plan porte le nom de *perspective*. Il en résulte que pour avoir la perspective d'un objet quelconque, il faut par tous les points de ce corps et par l'œil mener des lignes droites, et déterminer l'intersection de ce système de lignes par un plan qui occupe la position du tableau sur lequel la perspective doit être rapportée. D'après cela, si l'œil était placé au sommet d'un cône, une ligne quelconque tracée sur sa surface aurait la même apparence que la base du cône. On conçoit alors, que des figures tracées sur une surface changent complétement avec la position de l'œil; et que, si l'on traçait sur un mur une figure régulière vue d'un point voisin de sa surface et très-éloigné, cette figure pour l'œil placé en face pourrait être très-déformée. Ces figures portent le nom d'*anamorphoses*.

1324. *Accidents de la vue.* La distance de la vue distincte n'est pas la même chez tous les individus. Avec l'âge, la partie antérieure de l'œil s'aplatit et, par conséquent, la convergence des rayons lumineux diminue; il faut alors, pour que les rayons forment leur foyer sur la rétine, que la divergence des rayons qui arrivent à l'œil soit très-petite et, par conséquent, que les objets soient éloignés. Cet état de l'œil a reçu le nom de *presbytisme;* on y remé-

die en plaçant devant l'œil une lentille convergente : car, la divergence des rayons étant diminuée par l'interposition de la lentille, tout se passe comme si les rayons partaient de plus loin. Le défaut opposé se rencontre souvent, et dans tous les âges, on le désigne sous le nom de *myopisme;* la cornée transparente est trop convexe, les rayons deviennent trop convergents, les foyers des objets éloignés se forment en avant de la rétine, et la vision est confuse. On obvie à cet inconvénient en plaçant devant l'œil une lentille divergente : la divergence des rayons incidents se trouve alors augmentée, et tout se passe comme si l'objet était plus rapproché. Pendant longtemps, les verres biconvexes ou biconcaves ont été uniquement employés; mais Wollaston a proposé l'usage des verres concaves-convexes (2mes lentilles des fig. 753 et 754), afin de distinguer plus nettement les objets placés très-obliquement : pour cet usage, ces verres portent le nom de *périscopiques.* Dans ces lentilles, le champ est augmenté; mais les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité sont plus grandes.

Lorsqu'on connaît la distance de la vue distincte d'un presbyte ou d'un myope, il est très-facile de déterminer les foyers des lentilles convergentes ou divergentes qui leur conviennent. En effet, désignons par a la distance de la vue distincte ordinaire, et par b la distance de la vue distincte du presbyte ou du myope, et par x la distance focale principale de la lentille.

Dans le premier cas, la lentille doit être convergente, et un objet placé à la distance a doit faire son foyer à la distance b : nous avons alors entre les quantités a, b et x, la relation

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{x}; \quad \text{d'où } x = \frac{ab}{b-a}.$$

(Dans cette formule nous avons changé le signe de b, parce que les deux foyers conjugués sont du même côté de la lentille.) Par exemple, si la distance de la vue distincte du presbyte était de 80 centimètres, la distance de la vision distincte ordinaire étant de 25 centimètres, on aurait

$$x = \frac{80 \times 25}{80 - 25} = 36{,}36.$$

Dans le cas du myopisme, en conservant la même notation, nous aurons

$$-\frac{1}{b} + \frac{1}{a} = -\frac{1}{x}; \text{ d'où } x = \frac{ab}{a-b}.$$

1525. On rencontre chez quelques individus une affection singulière de la rétine, qui consiste dans l'inaptitude à percevoir certaines couleurs, et principalement le rouge. Je citerai deux frères

que j'ai eu l'occasion d'observer, et dont l'un était élève de l'École centrale. Ayant tracé sur du papier des teintes de différentes couleurs numérotées, je demandai successivement à chacun d'eux les numéros des teintes qui leur paraissaient identiques, ou du moins qui ne différaient que par l'intensité. Les jugements des deux frères furent les mêmes : pour eux, le carmin, le violet et le bleu étaient des couleurs identiques ; ils confondaient complétement le rouge du peroxyde de fer avec le vert, le rouge garance des pantalons des troupes avec le vert des arbres ; le jaune était une couleur bien distincte, d'un grand éclat. Ces faits s'expliquent facilement en admettant que ces jeunes gens ne voyaient pas le rouge ; pour eux, les objets devaient se présenter sous le même aspect que quand nous regardons à travers un verre vert.

1326. Wollaston et M. Arago ont éprouvé à plusieurs reprises une anomalie passagère fort singulière dans la vision. Ils ne voyaient que la moitié des objets, toujours une moitié séparée de l'autre par un plan vertical, et la même moitié avec chaque œil ; mais tantôt le côté droit, tantôt le côté gauche. Wollaston a déduit de là que c'était le même nerf qui s'épanouissait dans les parties droites de chacune des deux rétines, et le même qui en formait les parties gauches.

§ 3. *Appareils et instruments d'optique.*

1327. *Miroirs plans.* Nous avons dit que, quand un point lumineux envoie des rayons sur un miroir plan, tous les rayons réfléchis prolongés passent par un point situé derrière le miroir sur la perpendiculaire abaissée du point lumineux, et à une distance du miroir égale à celle du point lumineux : or, comme l'œil rapporte les objets aux points de concours des derniers rayons qu'il en reçoit, l'image du point lumineux O (fig. 792) sera vue en O'. Il est facile de déduire de là que l'objet et son image sont toujours symétriquement placés par rapport au miroir (fig. 793).

1328. Si deux miroirs AB et CD (fig. 794) sont parallèles, les rayons émanés du point lumineux *m* pourront arriver à l'œil placé en O après une ou plusieurs réflexions ; et, par conséquent, il apercevra dans chacun d'eux une série d'images dont les teintes iront en s'affaiblissant, à mesure que les rayons qui les forment auront subi un plus grand nombre de réflexions. Pour trouver les lieux de ces images, il suffit de remarquer que tous les rayons qui ont subi

une réflexion vont concourir à la première image : par conséquent, tout se passe comme si cette image était lumineuse. Ainsi, on trouvera l'image qui résulte de deux réflexions en cherchant l'image de *a* dans le miroir CD, et l'image de *b* dans le miroir AB; de même, en traçant les images des points *a'* et *b'* dans les miroirs AB et CD, on obtiendra celles qui proviennent de trois réflexions, et ainsi de suite. On voit, d'après cela, que les deux séries d'images sont situées sur une même ligne droite perpendiculaire aux deux miroirs.

1329. Les miroirs en glace étamée présentent une série d'images, lorsqu'on regarde la glace sous des angles très-petits. L'explication de ce phénomène est très-simple. Une partie de la lumière est réfléchie à la première surface de la glace, et donne une première image; une autre partie de la lumière pénètre et se réfléchit contre la surface métallique; mais, lorsque cette lumière se présente pour sortir, une portion est réfléchie intérieurement, retourne à la seconde surface, et ainsi de suite. Par conséquent, il y a deux images qui proviennent d'une seule réflexion, l'une à la surface supérieure, l'autre à la surface inférieure, et une suite d'autres images qui proviennent de 3, 5, 7, etc., réflexions; c'est toujours la deuxième image qui est la plus brillante. Elles sont toutes très-rapprochées quand la réflexion a lieu sous un angle un peu considérable, à cause de la petite épaisseur de la glace; pour les distinguer, il faut les observer sous un très-petit angle, afin de les écarter et de les rendre plus brillantes.

On explique facilement, d'après ce qui précède, les anneaux brillants qu'on observe en regardant dans un tube de verre noirci extérieurement, fermé à chaque extrémité par une feuille de papier percée à son centre d'un trou d'épingle; et il est facile de reconnaître (fig. 794 A) qu'en désignant par *d* le diamètre intérieur du tube, les diamètres des anneaux sont $2d$, $4d$, $6d$, etc.

1330. Lorsque deux miroirs AB et AC (fig. 795) sont inclinés, il est évident que les images successives des bords des miroirs feront entre elles des angles égaux à celui des deux miroirs; par conséquent, si l'angle CAB est une fraction exacte de la circonférence ayant 1 pour numérateur, ces images, après avoir fait une révolution autour du point A, se superposeront sur les premières, et l'espace autour du point A paraîtra divisé en secteurs égaux. Par la même raison, un objet placé devant les miroirs donnera deux images dans chaque secteur, et l'ensemble de toutes ces images

présentera une parfaite symétrie. Mais, pour cela, il faut que l'angle des miroirs soit une partie aliquote de la circonférence : car autrement les séries circulaires d'images ne se superposent qu'en partie, et deviennent diffuses.

C'est sur ce principe que sont construits les petits appareils connus sous le nom de *kaléidoscopes*. Ils sont formés d'un tuyau circulaire renfermant deux glaces inclinées, réunies sur une arête du tuyau; à une des extrémités, le tuyau est fermé par une plaque percée d'un petit orifice par lequel on regarde, et, à l'autre extrémité, par deux verres plans dont l'un est dépoli, et entre lesquels on met différents petits objets, tels que des morceaux de verres colorés : l'angle des miroirs étant convenable, on voit une figure symétrique, qui change en tournant le cylindre, par le déplacement des objets renfermés entre les deux verres. Le même effet serait produit par une lentille prismatique ayant la forme d'une pyramide régulière d'un nombre quelconque de faces, l'œil étant placé dans la direction de l'axe.

1331. On doit à M. Plateau une expérience fort curieuse dans laquelle la lumière semble se propager en ligne courbe. Supposons qu'on ait placé, sur une feuille de papier étalée sur une table, une lame d'un métal poli, d'une petite largeur, qui ait été courbée sur un cylindre dans le sens de sa longueur, et de manière que ses génératrices soient verticales; si l'on fait arriver un rayon de lumière horizontal dans la partie concave de la surface et dans la direction d'une des tangentes extrêmes de la plaque, le rayon en suivra la courbure, et éclairera la courbe de contact de la lame et de la feuille de papier. Dans cette expérience, il y a une suite de réflexions qui s'effectuent sur les éléments consécutifs de la courbe.

1332. M. Colladon avait fait avant M. Plateau une expérience qui a beaucoup d'analogie avec celle que nous venons de rapporter, et qui, au premier abord, paraît fort singulière. Un vase plein d'eau est percé latéralement d'une ouverture par laquelle s'échappe une veine liquide; en face de cet orifice, et dans la paroi opposée du vase, on a pratiqué une ouverture fermée par une lentille convergente, dont le foyer principal correspond à l'orifice d'écoulement. L'appareil étant placé dans une chambre obscure, on fait arriver un faisceau de rayons solaires horizontal sur la lentille, les rayons arrivent à l'origine de la veine, et rencontrent sa surface sous des angles trop grands pour la traverser; ils éprouvent alors une série de réflexions totales qui les propagent dans la veine, sans

que leur présence se manifeste; mais ils s'échappent aussitôt que la veine se divise, ou par l'effet de la pesanteur, ou par la rencontre d'un obstacle.

1333. *Appareil de M. Soleil et de M. Silbermann pour vérifier les lois de la réflexion et de la réfraction.* Cet appareil, qui peut servir à vérifier presque toutes les lois de l'optique, est représenté en élévation dans la fig. 1021. Il se compose d'un cercle en cuivre vertical fixe, divisé, dont la face postérieure porte deux alidades mobiles A et B : la première est terminée d'un côté par un petit miroir *a*, au moyen duquel on peut donner à un rayon de lumière la direction de l'axe de l'alidade, dont la position est déterminée par un vernier *b*; à l'extrémité opposée se trouve une pointe *c* et un trait placé dans l'axe. L'autre alidade, qui ne se prolonge que d'un seul côté, se termine comme la première; mais elle porte un vernier *d*, et une douille *e* renfermant un diaphragme percé d'un petit orifice. DE est une règle horizontale divisée en millimètres; elle est fixée à une douille qui permet de la placer à différentes hauteurs. Pour vérifier les lois de la réflexion, on place sur le diamètre vertical du cercle une tige de cuivre portant, à la hauteur du centre du cercle, une petite plaque horizontale de verre ou de métal poli, ou un petit godet dans lequel on met un liquide, de manière que sa surface soit au niveau du diamètre horizontal du cercle; puis, au moyen de l'alidade A, on fait arriver un rayon solaire au centre de la surface, et on place l'alidade B de manière que le rayon réfléchi soit dirigé suivant son axe : les deux verniers donnent les angles d'incidence et de réflexion. Pour constater les lois de la réfraction, on place devant le cercle, un vase formé d'un cylindre de verre de 4 à 5 centimètres de hauteur, d'un diamètre plus petit que celui du cercle, et fermé par deux glaces mastiquées sur ses bords (fig. 1022). Le cylindre est rempli d'eau ou d'un liquide quelconque, à la hauteur du centre du cercle; un rayon de lumière arrivant dans une direction quelconque au centre de la surface liquide par l'alidade A, on place l'alidade B dans la direction du rayon réfracté, et on élève la tige CD, de manière que les extrémités *o* et *o'* des alidades la rencontrent successivement : on obtient ainsi les sinus des angles d'incidence et de réfraction.

1334. *Photomètre de M. Bunsen.* Imaginons qu'au milieu d'une feuille de papier tendue dans un cadre, on ait collé un très-petit disque de papier peu épais; le cadre étant éclairé par derrière au moyen d'une lampe, supposons qu'on l'éclaire sur l'autre face par

une lumière A : si d'abord elle est à une distance convenable, on apercevra le petit disque de papier ; mais si on approche progressivement cette lumière, la teinte du disque diminue et finit par s'effacer ; si on désigne à cet instant par T et t les intensités de la lumière transmise par chaque point de la surface nue de l'écran et par ceux qui recouvrent le disque, par r et R les intensités des rayons réfléchis, on aura évidemment $T+r=t+R$. Si on répète la même expérience en employant une autre lumière B, à l'instant de la disparition du disque, le cadre sera éclairé exactement comme il l'était d'abord, et, par conséquent, les intensités des deux lumières seront dans le rapport des carrés de leurs distances à l'écran.

1335. *Photomètre de M. Masson.* Ce photomètre a été imaginé pour mesurer les intensités des lumières instantanées, comme celle qui accompagne la décharge d'une batterie électrique ; mais il peut servir pour toutes les lumières en les rapportant à celle d'une étincelle électrique qui se produit dans des conditions identiques. Voici le principe du photomètre dont il s'agit : un disque de carton de 8 centimètres de diamètre est divisé en 60 secteurs, alternativement blancs et noirs (fig. 1023) ; les blancs sont formés par le papier dans son état naturel ; les noirs ont été obtenus avec la couleur connue dans le commerce sous le nom de noir de lampe, et qui donne à la teinte un mat qu'on n'obtiendrait pas avec l'encre de Chine. Le disque de carton est fixé sur un axe, auquel un mouvement d'horlogerie imprime une vitesse de 250 à 300 tours par seconde : lorsqu'il est éclairé par une lumière permanente, il prend une teinte grisâtre, dont l'éclat dépend à la fois de l'intensité du foyer et de sa distance à la plaque, et qui est indépendante de la vitesse de rotation, quand elle a dépassé une certaine limite. Le disque étant éclairé par une lumière permanente, s'il est subitement illuminé par une lumière instantanée, une étincelle électrique, par exemple, pour une intensité convenable de cette lumière, les secteurs apparaîtront, et si l'on affaiblit progressivement cette lumière, les secteurs finiront par disparaîtrre. A cet instant, l'éclat des secteurs blancs, instantanément éclairés, ne diffère de la teinte uniforme du disque que d'une quantité plus petite que celle que l'œil peut apprécier. Il est évident que, par ce procédé, on peut comparer des lumières permanentes à celle de la même étincelle, ou celle d'étincelles produites dans différentes circonstances à celle d'une même lumière permanente. Il résulte des nombreuses expériences de M. Masson : 1° que les secteurs dispa-

raissent presque brusquement, et qu'il n'y a que très-peu d'incertitude sur l'éclat de la lumière qui occasionne ce phénomène ; 2° que l'instant de la disparition des secteurs est indépendante de la couleur de la lumière et de celle du disque ; 3° que l'œil peut observer des teintes qui ne diffèrent que de 1/60, et même, pour certaines personnes, de 1/120. Ces fractions représentent, par conséquent, la limite d'erreur dans l'emploi de l'instrument; elles ont été obtenues par un mode d'expérience très-simple. Sur un disque de carton blanc (fig. 1024), on a tracé en noir une partie *mn* d'un secteur sous-tendant un arc égal à $1 : m$ de la circonférence; en faisant tourner rapidement le disque, la partie noire produira une couronne formée de $(m-1)$ parties blanches et de 1 partie noire, et dont l'éclat, comparé à celle des couronnes blanches situées au-dessus et au-dessous, sera $(m-1) : m$, et la différence $1 : m$. En faisant varier le nombre m jusqu'à ce que l'on cesse de distinguer la couronne parcourue par la partie noircie du secteur, on obtient la limite de sensibilité de l'œil de l'observateur. Ces résultats ne changent pas avec l'intensité de la lumière et la couleur du disque.

C'est au moyen du photomètre dont nous venons de parler que M. Masson a constaté que l'intensité de la lumière produite par la décharge d'un condensateur est proportionnelle aux surfaces de condensation, au carré de la distance d'explosion, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante ; ou, en raison directe de la tension électrique et de la surface du condensateur.

La formule qui représente l'intensité de la lumière à l'unité de distance, et pour une épaisseur constante de la lame isolante, est $I = kd^2s$; k étant un coefficient constant, d la distance d'explosion et s la surface du condensateur. Si l'on désigne par q la quantité totale d'électricité des condensateurs, celle qui correspondra à l'unité de surface sera $q : s$, la tension sera $q^2 : s^2$, et, comme d'après MM. Harris et Riess, $d = k'q : s$, k' étant un coefficient qui change avec le condensateur, on a, $I = k''q^2s = k''\frac{q^2}{s^2}.s$, équation qui représente la dernière loi énoncée.

1336. *Goniomètres.* On désigne ainsi les instruments destinés à mesurer les angles des corps solides. Les plus simples sont formés de deux règles mobiles sur une charnière, qu'on applique sur les faces dont on veut mesurer l'inclinaison, et que l'on porte ensuite au centre d'un cercle divisé qui en mesure l'écartement; mais on leur substitue avec avantage les appareils suivants :

1337. *Goniomètre de Charles.* Cet instrument consiste (fig. 796) en un cercle de cuivre divisé AB, dont le centre porte une alidade mobile; à côté, se trouve une lunette horizontale fixe CD renfermant à son foyer un fil vertical. Pour mesurer les angles d'un cristal, on le fixe au centre de l'alidade avec de la cire; on dirige la lunette sur le cristal; et, en regardant, par réflexion, successivement sur chacune des deux faces du cristal, l'image d'une ligne verticale, on s'assure que la ligne d'intersection des deux faces a cette direction. Alors on dispose l'alidade de manière que l'image soit placée derrière le fil, et on la fait tourner jusqu'à ce que l'image formée sur l'autre face coïncide également avec le fil : l'angle décrit par l'alidade est alors le supplément de l'angle des deux faces du cristal. En effet, soit *o* (fig. 797) le centre de rotation, *om* et *on* deux perpendiculaires abaissées du point *o* sur les deux faces du prisme, pour que la face AC devienne parallèle à AB, la ligne *on* doit prendre la position de *om*, et, par conséquent, le cristal doit tourner d'un angle *nom*, supplément de l'angle A.

1338. *Goniomètre de Wollaston.* Cet instrument est fondé sur un principe analogue à celui de Charles; mais il est d'un usage beaucoup plus commode. Imaginons que nous ayons deux mires horizontales très-éloignées, telles que deux arêtes d'un toit, deux lignes horizontales d'un bâtiment, et que le cristal, fixé à un axe horizontal qui peut tourner sur lui-même, soit assez voisin du centre de rotation pour que les angles formés par les rayons d'une même mire qui seraient tangents à la surface qui enveloppérait le cristal dans les positions qu'il prend successivement dans une révolution complète soient sensiblement nuls : une des mires, vue sur le prolongement horizontal du cristal, donnera une direction constante. Alors, en faisant coïncider cette direction, que l'œil retrouve toujours facilement, avec l'image de l'autre mire, réfléchie successivement sur les deux faces dont on veut mesurer l'inclinaison, l'angle de rotation sera le supplément de l'angle des deux faces. Le goniomètre de Wollaston (fig. 798) est composé d'un cercle vertical de cuivre, gradué sur son bord, et mobile autour d'un axe AA qui est supporté par un pied P; l'axe AA est percé dans toute sa longueur pour laisser passer un axe intérieur *aa*, dont une des extrémités porte plusieurs pièces à mouvements rectangulaires, sur lesquelles on fixe avec une petite pince le cristal dont on veut mesurer les angles. Pour se servir de cet instrument, on commence par placer le limbe verticalement, et le cristal de manière que l'arête commune des

deux faces dont on veut mesurer l'inclinaison soit horizontale ; pour remplir cette dernière condition, on regarde des lignes horizontales d'un édifice, et on tourne le cristal jusqu'à ce que les lignes supérieures vues par réflexion soient sur le prolongement des lignes inférieures vues directement : les deux faces remplissant cette condition, leur intersection est horizontale. Pour mesurer l'angle des deux faces, il ne faut plus que répéter cette observation successivement sur l'une et sur l'autre, en faisant mouvoir le cristal avec le limbe au moyen de l'axe AA : l'angle décrit est le supplément de l'angle cherché. L'instrument est gradué de manière à donner cet angle lui-même quand on met d'abord l'index sur le zéro.

Nous avons supposé dans ce qui précède qu'on amenait le rayon réfléchi sur le prolongement de l'image directe vue au delà du cristal ; mais quand on observe la réflexion près du bord des faces, on voit la mire à travers le cristal, comme si les rayons le traversaient sans éprouver de déviation : on peut alors établir réellement la coïncidence des images. Pour comprendre la cause de ce phénomène, il faut remarquer que la vision d'un point se fait par un faisceau conique de lumière dont le sommet est au point lumineux, et dont la base est la pupille. Si on introduit dans le cône un écran qui intercepte en partie ce faisceau, l'image se fera toujours au même point de la rétine, et le point sera vu dans la même direction, celle de l'axe du cône ; seulement l'image sera d'autant plus faible que l'écran interceptera une plus grande partie du faisceau ; et si le bord de l'écran dépassait l'axe du cône, la direction de la vision du point lumineux rencontrerait l'écran.

M. Mitscherlich a fait au goniomètre de Wollaston plusieurs modifications, qui en rendent l'usage plus commode et plus sûr ; les mouvements que l'on doit faire éprouver au cristal pour amener l'arête des deux faces à être perpendiculaire au limbe, s'exécutent par des vis de rappel, et l'on observe les images au moyen d'une lunette fixée sur un support.

1339. *Goniomètre de M. Babinet.* Cet instrument se compose d'un cercle gradué (fig. 1025), mobile sur un genou de manière à pouvoir être placé dans une direction quelconque ; d'une alidade mobile, qui porte au centre du cercle un petit plan, sur lequel on fixe, avec de la cire, les corps sur lesquels on veut opérer, mais qui peut tourner sur lui-même indépendamment de l'alidade ; et de deux lunettes A et B, dont l'une est fixe et l'autre mobile autour du cercle : ces deux lunettes, dans toutes leurs positions relatives, ont

toujours leur axe optique dirigé au centre du cercle. Chaque lunette renferme un oculaire et un objectif; et à leur foyer commun, deux fils métalliques très-fins, qui se coupent à angle droit et sur l'axe optique. Il résulte de là, que l'une des lunettes étant tournée vers le jour, ses fils émettent des rayons parallèles, et peuvent remplacer les mires à une grande distance qui sont nécessaires dans le goniomètre de Wollaston.

Pour mesurer l'angle d'un cristal ou d'un prisme, on commence par régler chacune des lunettes de manière à voir distinctement des objets éloignés. Il faut alors placer un des fils de chacune parallèlement au cercle; pour cela, on amène la lunette B sur le prolongement de la lunette A, on aperçoit les quatre fils; on fait tourner l'oculaire de B jusqu'à ce que les fils soient parallèles, et on change la position des deux systèmes de fils jusqu'à ce que, par un petit mouvement de B à droite ou à gauche, la distance des fils horizontaux ne change pas. Le cristal est ensuite fixé avec de la cire sur la plaque centrale; mais il faut que l'arête commune des deux faces soit bien perpendiculaire au limbe, et pour cela on fait tourner l'alidade et la lunette B de manière à voir par réflexion les fils de la lunette A : la face sera verticale si le parallélisme des mires établi directement n'est pas changé, et s'il subsiste en imprimant à la lunette de petits mouvements à droite et à gauche. La même condition doit être remplie par l'autre face. On peut alors mesurer l'angle des deux faces. Pour cela, on commence par tourner, au moyen du tube oculaire, de 45° les fils de la lunette mobile, afin d'observer plus facilement la coïncidence des intersections des fils; puis on place l'alidade, sur la division du cercle opposée à celle qui correspond à la lunette fixe, la lunette mobile dans un point quelconque, et on fait tourner le support du cristal de manière à voir par réflexion la coïncidence des mires des deux lunettes; ensuite on fait tourner l'alidade de manière à amener la même coïncidence, par la réflexion, sur l'autre face. L'angle décrit par l'alidade est supplémentaire de celui des faces du cristal. Il est important de placer des écrans noircis autour du cristal de manière à faire dominer la lumière envoyée par la lunette fixe sur celle qui arrive directement sur le cristal.

Le même instrument peut servir à trouver la déviation minimum d'un prisme, et par suite son indice de réfraction au moyen de la formule [1267], ou celle du liquide qu'il contient quand il est formé de lames de verre à faces parallèles. Pour cela, le prisme étant

sur le support central, on amène la lunette mobile B à droite ou à gauche de la direction de la lunette fixe A, et, en tournant le support, on obtient bientôt une image du spectre solaire due au fil vertical de la lunette B, sur lequel se concentrent les rayons entrés par l'oculaire. En tournant doucement le support à droite ou à gauche, on voit en général le spectre sortir de la lunette par un côté ou par l'autre. En rapprochant alors la lunette B de la direction de A, et en tournant en même temps le support pour ne pas perdre le spectre de vue, on arrive après quelques tâtonnements à une position telle, que les deux mouvements contraires du support donnent un spectre qui s'écarte toujours dans le même sens : c'est le spectre de la déviation minimum. Parvenu à ce terme, on choisira un point du spectre, par exemple la ligne de démarcation du vert au rouge, puis on amènera le point de croisement des fils de la lunette mobile sur cette ligne de démarcation, et on notera l'angle indiqué par le nonius. On portera alors la lunette mobile de l'autre côté de la direction de la lunette A ; on cherchera de même le spectre limite, et on amènera le point de croisement des fils sur la même ligne de démarcation du vert au rouge. On aura alors entre les deux stations un angle dont la moitié est celui de la déviation minimum. Après quelques essais, on reconnaîtra que ces tâtonnements, dont la description a quelque chose de minutieux, ne présentent en réalité rien de difficile (M. Beudant, *Cours élémentaire d'histoire naturelle*).

1340. *Chambre claire.* Si on taille un prisme à quatre faces (fig. 799), de manière que deux d'entre elles soient perpendiculaires, et les deux autres tellement inclinées qu'elles réfléchissent les rayons entrés perpendiculairement à l'une des premières, et si l'on place l'œil en O, de manière que la moitié de la pupille reçoive les rayons réfléchis dans le prisme, et l'autre moitié les rayons émanés d'un papier placé au-dessous, il est évident que l'image des objets extérieurs se projettera droite sur le papier, et que l'œil apercevra en même temps la pointe d'un crayon qu'on promènerait sur sa surface : par conséquent, au moyen de cet appareil, on pourra calquer l'image de l'objet. On pourrait aussi amplifier les images en les regardant avec une loupe. Cet ingénieux instrument est dû à M. Wollaston.

Il est facile de calculer la valeur des angles A, B et C (fig. 800) du prisme : en effet, en supposant l'angle D droit, et que les rayons incidents entrent et sortent perpendiculairement aux faces CD et

AD, il est évident que l'angle $a = 45°$: alors l'angle de réflexion au point m, compté de la surface, est de 22° 30′, et par suite l'angle $A = 90° - 22° 30' = 67°30'$, et l'angle $B = 180° - 45° = 135°$. Pour le verre les réflexions seront totales : car l'angle limite du verre ordinaire est de 41° 48′ à compter de la normale, et de 48° 12′ à partir de la surface.

Pour que cet instrument soit d'un usage commode, il faut ajouter à l'appareil simple que nous venons de décrire, plusieurs dispositions indispensables :

1°. Le papier et la pointe du crayon étant supposés placés à la distance de la vue distincte, l'œil ne peut pas voir en même temps avec netteté les images des objets extérieurs et la pointe du crayon, quoique la pupille soit convenablement placée; pour éviter cet inconvénient, on place devant la face DC du prisme, une lentille convergente, qui donne aux faisceaux réfléchis la même divergence que les faisceaux qui sont reçus directement.

2°. La différence d'éclat de l'image réfléchie et du papier peut empêcher la vision distincte de l'un ou de l'autre; c'est pourquoi il est nécessaire d'adapter au prisme, un ou plusieurs verres colorés, que l'on tourne ou du côté des objets ou du côté du papier, pour en diminuer l'éclat.

3°. Pour maintenir l'œil dans une position convenable, on adapte à la partie supérieure du prisme une lame de cuivre percée d'une petite ouverture, que l'on place d'une manière convenable et à travers laquelle on regarde.

La chambre claire de M. Wollaston a été perfectionnée par Amici et par M. C. Chevalier. Nous renvoyons le lecteur, pour tous les détails de construction et pour les usages de cet appareil, à une petite brochure publiée en 1829 par M. C. Chevalier; nous rapporterons seulement le principe sur lequel ces perfectionnements sont fondés. Dans la disposition de Wollaston, un très-petit mouvement de l'œil fait varier très-rapidement l'intensité de la lumière de l'image ou du crayon; si l'œil s'avance un peu vers le prisme, l'image devient très-nette; mais on n'aperçoit plus le crayon : un mouvement contraire produit l'effet inverse. C'est pour obvier à cet inconvénient que M. Amici a imaginé de disposer l'appareil d'une manière différente. AB (fig. 801) est une lame de verre à faces parallèles; CDE est un prisme de verre fixé à la lame; les rayons qui arrivent dans le prisme perpendiculairement à la face CE se réfléchissent en totalité sur DE, ressortent perpendiculairement à DC,

se réfléchissent sur la face supérieure de la lame AB, et arrivent à l'œil, qui aperçoit en même temps le papier à travers la lame AB.

1341. *Héliostat.* Cet instrument a pour objet, comme son nom l'indique, de donner à un rayon réfléchi, qui pénètre dans une chambre obscure, une direction constante. Si la direction du rayon réfléchi était parallèle à celle de l'axe de la terre, le miroir devrait décrire une surface conique droite autour de cet axe, dont l'angle au sommet varierait avec la déclinaison du soleil. En effet, le rayon de la terre pouvant être négligé par rapport à la distance du soleil, ainsi que les variations de déclinaison pendant un jour, la courbe apparente décrite par le soleil est un cercle, et les rayons incidents sur le miroir forment une surface conique droite autour d'une ligne parallèle à l'axe de la terre; et, par conséquent, les rayons réfléchis auraient la direction de cet axe, si la normale au miroir décrivait uniformément et en un jour une surface conique droite, ayant pour angle au sommet la moitié du complément de la déclinaison d du soleil (fig. 802). Ce mouvement s'obtiendrait facilement à l'aide d'une horloge, qui ferait mouvoir une aiguille autour d'un cadran parallèle à l'équateur : le miroir serait mobile autour d'une pointe placée dans l'axe du cadran, et serait fixé à une tige perpendiculaire à son plan que l'aiguille entraînerait dans son mouvement. Si la direction du rayon réfléchi devait être différente, et c'est ce qui arrive toujours, car pour la plupart des expériences il doit être horizontal, on pourrait employer le même appareil, et donner au rayon la direction convenable en le faisant réfléchir sur un second miroir fixe; mais il y aurait beaucoup de lumière perdue par ces deux réflexions. Cette première solution du problème est due à Fahrenheit. Mais on peut diriger la queue du miroir à l'aide d'un mouvement d'horlogerie, de manière que le rayon réfléchi ait une direction quelconque.

En effet, supposons que PP' (fig. 803) représente l'axe de rotation diurne apparente du soleil, C un point de la surface de la terre, CM la direction constante que doit prendre le rayon réfléchi; le miroir est dirigé par une tige perpendiculaire à son plan, dont il faut déterminer la position à chaque instant, de manière que le rayon réfléchi ait la direction donnée. Pour cela supposons que le plan de la figure soit celui du méridien qui renferme CM; prolongeons CM d'une quantité quelconque CA, que nous désignerons par a, et prenons sur le prolongement de SC une longueur $CB = a$; si on joint

les points A et B, la droite CK, qui passe par le point K milieu de AB, sera la position de la queue du miroir quand le soleil sera en S; pour avoir les positions du point K pour les autres position du soleil, il faut prolonger les rayons au-dessous du point C d'une quantité égale à a, joindre les extrémités de ces prolongements avec le point A, et prendre le milieu de chacune de ces droites. Mais, si par le point B on mène un plan perpendiculaire à CP′, ce plan coupera la seconde nappe du cône SCS′ suivant un cercle BB′, qui sera le lieu des extrémités des rayons solaires prolongés au-dessous du point C d'une quantité a : alors le lieu des lignes par le milieu desquelles passe la queue du miroir sera le cône oblique ABB′, et les milieux des arêtes étant sur un cercle parallèle à BB′, il s'ensuit que la queue du miroir décrit un cône oblique à base circulaire parallèle à l'équateur. L'arête CB′ de la seconde nappe du cône des rayons incidents étant égale à a, le rayon du cercle BB′ est égal à $a \cos d$, d étant la déclinaison du soleil : par conséquent, en désignant par R le rayon du cercle KK′, on a $R = a \cos d : 2$.

Menons par le point O′, centre du cercle KK′, la ligne O′E parallèle à PP′, cette droite rencontrera AC en un point E, milieu de AC; et, si par le point E on mène la ligne EK, cette ligne sera évidemment parallèle à CB : par conséquent, si la ligne EO′ était une tige métallique, l'ombre qu'elle porterait sur le plan du cercle KK′ passerait par le point de rencontre de la queue du miroir avec ce plan. Il résulte de là que, si le mouvement de la queue du miroir est dirigé par un rayon du cercle KK′, ce rayon devra se mouvoir de manière à se trouver dans l'ombre projetée par le style EO′ : le rayon devra donc se mouvoir comme l'ombre du style d'un cadran équatorial, c'est-à-dire indiquer l'heure vraie à chaque instant. En désignant par l la longueur du style O′E, on a évidemment $l = R \tang d$.

C'est sur ce principe que sont fondés tous les héliostats à un seul miroir. Le plus ancien est celui de 'sGravesande. Il se compose, 1° d'un miroir métallique ab (fig. 804) qui peut prendre autour du point c toutes les positions possibles; il est garni d'une tige ck qui sert à le diriger; 2° d'une horloge dont le cadran de est incliné à l'horizon d'un angle égal à la latitude du lieu, et dont la ligne de midi est dirigée suivant la ligne de plus grande pente; 3° d'une aiguille or mue par l'horloge, qui, à l'aide de deux mouvements rectangulaires, entraîne la queue du miroir. Nous n'en donnons point la description détaillée ni la manière de le disposer, parce

qu'il n'est pas d'un usage commode, et que son orientation exige des calculs qui sont évités dans des dispositions imaginées par M. Gambey et par M. Silbermann.

1342. *Principe de l'héliostat de M. Gambey.* Soit MN (fig. 805) une roue dentée parallèle à l'équateur, qu'une horloge fait tourner uniformément autour du cylindre fixe PP′, perpendiculaire à son plan, de manière que la rotation s'effectue dans un jour. Soit PR une tige entraînée par le cercle mobile; et faisant avec MN un angle égal à la déclinaison du soleil : cette tige dans son mouvement restera toujours parallèle aux rayons solaires; soit *mn* un miroir mobile autour de la droite OP et d'une ligne tracée dans son plan perpendiculairement à OP; la tige PR, à une distance PK = PO, porte une douille à deux mouvements rectangulaires, dans laquelle s'engage une tige *np* fixée au miroir, dans son plan, et perpendiculairement au second axe de rotation. Il résulte de cette disposition que le cercle MN en tournant entraîne PK ainsi que la tige *np* du miroir; et que, dans toutes les positions, les rayons incidents étant parallèles à PR, le plan du miroir étant toujours perpendiculaire au plan du triangle OPK, et PO étant égal à PK, les angles *a* et *b* sont égaux, et le rayon réfléchi a la direction constante PQ, qui est d'ailleurs arbitraire. On voit d'après cela que l'établissement de l'héliostat consiste uniquement à placer MN parallèlement à l'équateur, à faire l'angle P′PR égal au complément de la déclinaison du soleil, et à donner à PQ la direction du rayon réfléchi.

1343. *Héliostat de M. Silbermann.* Cet instrument étant plus simple, d'un prix moins élevé et d'un usage plus facile que ceux que nous avons indiqués, nous le décrirons avec tous les détails nécessaires, en prenant pour guide le rapport si clair et si précis que M. Regnault a fait à l'Académie des sciences sur cet appareil (*A. C. et P.*, t. x).

« Dans l'héliostat de M. Silbermann (fig. 1026), il y a, comme dans tous les héliostats, une horloge dont le plan EE′E″ doit être placé parallèlement à l'équateur, de sorte que l'axe PP′ qui porte l'aiguille se trouve dirigé suivant l'axe du monde. A cet effet, la boîte de l'horloge est supportée par un axe horizontal AA′ qui tourne dans des coussinets adaptés aux deux supports verticaux AS, A′S′. Ces supports sont fixés sur un disque horizontal en cuivre DD′D″, mobile autour d'un axe vertical CG fixé lui-même sur un trépied à vis, qui permet de placer le disque dans une posi-

tion parfaitement horizontale; le disque porte à cet effet un niveau à bulle d'air, et comme le disque est mobile autour de son axe, ce seul niveau suffit pour établir l'horizontalité parfaite.

« Le disque ayant été placé dans un plan horizontal, on le fait tourner jusqu'à ce que la ligne qui joint midi et minuit (le cadran est divisé en vingt-quatre heures) se trouve placée dans le plan méridien du lieu; l'axe de suspension AA' de l'horloge se trouve alors perpendiculaire à ce plan. On fait tourner ensuite le plan du cadran autour de son axe horizontal jusqu'à ce qu'il se trouve parallèle au plan de l'équateur : à cet effet, l'axe de suspension du cadran porte un quart de cercle divisé FF', et le support vertical correspondant AS un vernier; on fait tourner l'horloge jusqu'à ce que le zéro du vernier corresponde à la division du cercle qui exprime la latitude du lieu (c'est-à-dire 48° 50' 14" pour Paris). On arrête le plan de l'horloge dans cette position, en serrant le quart de cercle avec une vis de pression *v* : l'axe de l'horloge se trouve alors dirigé suivant l'axe du monde, et si l'on suppose cet axe prolongé sous forme de style, au-dessus du plan du cadran, on aura un véritable cadran solaire équinoxial, et l'ombre portée du style marquera le temps vrai sur le cadran de l'horloge.

« Cela posé, supposons un miroir plan métallique *mn*, disposé de façon à ce que son centre de figure soit traversé par l'axe prolongé de l'horloge, et voyons quelle position et quel mouvement il faudra donner à ce miroir pour qu'il réfléchisse constamment les rayons solaires suivant une direction déterminée. Considérons le rayon incident IO au centre du miroir et le rayon réfléchi OR : ces deux rayons sont renfermés dans un même plan, ainsi que la normale ON au miroir, et cette normale divise en deux parties égales l'angle IOR formé par les rayons incident et réfléchi. Si l'on prend sur ces deux directions des longueurs égales, et que l'on construise un parallélogramme sur ces deux longueurs, la normale au miroir sera nécessairement la diagonale de ce parallélogramme. Or, des deux côtés qui déterminent ce parallélogramme, l'un est fixe, c'est celui qui est formé par le rayon réfléchi qui doit rester constant; le second côté est mobile, il représente la direction du rayon solaire incident. Il faudra donc que l'horloge fasse mouvoir le miroir de telle façon que le plan passant par la direction constante du rayon réfléchi et par la normale au miroir, passe constamment par le soleil, et que l'angle formé par la normale avec la direction constante du rayon réfléchi soit toujours

égal à l'angle que cette même normale fait avec le rayon solaire incident. Voyons comment M. Silbermann satisfait mécaniquement à ces conditions.

« L'axe de l'horloge est formé par une tige en acier qui traverse deux cylindres creux concentriques, ou manchons. Le premier de ces deux cylindres, ou manchon intérieur, est fixé invariablement sur la boîte de l'horloge; il porte le cadran *ee'e''* divisé en vingt-quatre heures. Le manchon extérieur tourne au contraire librement autour de son axe; mais il peut être fixé sur la boîte de l'horloge au moyen d'une vis de pression *r*. Ce manchon porte à sa partie supérieure une coulisse KK' dans laquelle glisse un arc de cercle en laiton LL'L'', dont le plan passe constamment par l'axe PP' de l'horloge; une vis de pression *t* permet d'arrêter ce cercle dans une position quelconque de la coulisse. L'extrémité L de cet arc de cercle porte une tubulure normale dans laquelle peut tourner un des deux axes LH qui maintiennent le miroir. Cet axe doit représenter la direction constante du rayon réfléchi. On conçoit que cet axe peut recevoir une direction quelconque, puisqu'on dispose de deux mouvements : le premier, qui est un mouvement de glissement de l'arc dans la coulisse, permet de diriger le rayon réfléchi suivant une ligne quelconque placée dans le même plan méridien; le second mouvement, qui est un mouvement de rotation autour de l'axe du monde, permet de l'amener dans tous les méridiens. On fixe ensuite la direction du rayon réfléchi au moyen des deux vis de pression *r* et *t*.

« Voyons maintenant la partie de l'appareil qui représente le rayon incident, c'est-à-dire la ligne qui visera constamment au soleil. On suppose que le mouvement du soleil se fait pendant une journée, suivant un cercle parallèle à l'équateur; en d'autres termes, on suppose que le soleil ne change pas de déclinaison pendant la durée des expériences. Cette hypothèse n'est pas exacte, mais l'erreur qui en résulte est peu considérable pour le temps très-court (quelques heures) pendant lequel on fait fonctionner ordinairement l'héliostat.

« L'axe de l'horloge porte à sa partie supérieure une pièce carrée *ii'i''* qui peut tourner autour de cet axe; cette pièce porte, fixée perpendiculairement sur une de ses surfaces, l'aiguille qui marque les heures sur le cadran *ee'e''*, et sur la face perpendiculaire une coulisse dans laquelle glisse un arc de cercle JJ'J'' divisé, dont le plan passe constamment par l'axe du monde PP'. Nous appelle-

rons ce cercle *le cercle de la déclinaison :* à 90 degrés du zéro de la division se trouve fixé sur ce cercle un anneau J″ dans lequel tourne le second axe J″Q, qui devra guider le miroir et qui devra suivre constamment la direction du rayon incident IO. A cet effet, on fixe le cercle à la déclinaison qui correspond au jour où l'on fait l'expérience (on trouve cette déclinaison, pour tous les jours de l'année, dans la *Connaissance des temps* ou dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*); et si le cadran est orienté, comme nous l'avons supposé, il est clair qu'il suffira de mettre l'aiguille à l'heure (temps vrai), de fixer le tout avec des vis de pression, pour que l'axe dont il est question vise vers le soleil et le suive pendant son mouvement.

« M. Silbermann a adapté sur le cercle de déclinaison un petit appendice qui permet de vérifier facilement si cette dernière condition est remplie; il a fixé à la seconde extrémité J du cercle de déclinaison un petit plan perpendiculaire au plan du cercle et dirigé suivant le rayon; ce plan est percé d'une petite ouverture : par le centre de cette petite ouverture, il mène une parallèle JJ′ à la direction de l'axe qui représente le rayon incident, et au point J′ où cette parallèle coupe de nouveau le cercle de la déclinaison, il élève un petit plan ou *mire,* parallèle au premier, sur lequel il trace deux lignes croisées à angle droit; la ligne qui joint le centre de l'ouverture au point de croisement de la mire est donc parallèle à la direction du rayon incident; par conséquent, si l'appareil est bien orienté, il faudra que les rayons solaires viennent peindre l'image de l'ouverture au centre de la mire.

« Cet appendice a une autre utilité, il permet de se passer de la connaissance d'une des trois données : la direction du plan méridien, l'heure vraie, la déclinaison.

« Supposons que l'on connaisse la déclinaison et la direction du plan méridien, mais que l'on ne connaisse pas l'heure vraie; il suffira, après avoir orienté le cadran, de régler le cercle de la déclinaison, et l'on fera tourner ensuite le plan de ce cercle autour de l'axe de l'horloge jusqu'à ce que l'image de l'ouverture se projette sur le croisement de la mire; l'horloge se trouvera ainsi mise à l'heure vraie.

« Si, au contraire, on connaît l'heure vraie, mais pas la déclinaison, on mettra l'horloge *orientée* à l'heure, et l'on fera glisser le cercle de la déclinaison dans la coulisse jusqu'à ce que l'image de l'ouverture tombe sur le centre de la mire. M. Silbermann a fait

graver sur la seconde face du cercle de déclinaison, en regard des degrés marqués sur la première, les jours de l'année auxquels correspondent ces déclinaisons moyennes en prenant pour base les déclinaisons de 1842. Cette division peut servir pour régler approximativement l'héliostat sans avoir à recourir aux tables de l'*Annuaire*.

« Enfin, si l'on connaît l'heure vraie et la déclinaison, mais pas le plan méridien, on commencera par mettre l'horloge à l'heure vraie, on fixera le cercle de déclinaison, et l'on tournera tout l'appareil autour de la verticale, en faisant tourner le disque horizontal qui supporte la boîte de l'horloge, jusqu'à ce que l'image de l'ouverture vienne se projeter sur le centre de la mire.

« Nous venons d'indiquer quelles sont les parties de l'appareil qui représentent constamment la direction du rayon incident et la direction fixe du rayon réfléchi : voyons maintenant comment on fera mouvoir le miroir de manière à satisfaire à ces conditions. Supposons les directions de ces parties de l'appareil prolongées : elles se couperont en un point *o*, qui devra être le centre du miroir, et détermineront le plan de réflexion ; il suffira que le miroir se meuve de façon que sa normale reste constamment dans ce plan et divise l'angle des deux rayons en deux parties égales.

« Pour satisfaire à cette condition, on a maintenu le miroir entre deux fourchettes à charnières *Qab*, *Hab*, dont l'axe de rotation commun *ab* passe par le centre *o* du miroir, et se trouve perpendiculaire au plan de réflexion ; de cette manière, les côtés de la première fourchette se trouvent parallèles au rayon réfléchi. On a pris sur les branches correspondantes des deux fourchettes, à égale distance de leur point de concours, deux points *c*, *d*, dans lesquels on a adapté, à charnières, deux petites tiges égales en longueur *cf*, *df*, de manière à produire un quadrilatère articulé *acfd*. La ligne qui joint le point de concours *f* de ces petites tiges avec le point de concours *a* des branches des deux fourchettes reste nécessairement toujours dans le plan de réflexion, et divise en deux parties égales l'angle des rayons incident et réfléchi ; il suffira donc de forcer la normale au miroir à passer constamment par ces deux points de concours. Cette normale est représentée par une queue *af* à rainure fixée perpendiculairement au miroir dans le point de concours même *a* des branches des fourchettes, et dans cette rainure glisse la goupille qui réunit à articulation les deux tiges *cf*, *df*, qui complètent le quadrilatère. »

1344. *Miroirs courbes*. Les miroirs concaves sont quelquefois employés pour produire une très-haute température à leur foyer, en les exposant aux rayons solaires. Les miroirs sphériques conviennent peu à cet usage, parce que tous les rayons réfléchis ne passent pas rigoureusement par le foyer; les miroirs paraboliques sont bien préférables. Avec un miroir parabolique construit pour cet objet par M. Villèle, de Lyon, en alliage de cuivre et d'étain, et qui avait $1^{m},30$ de diamètre et $90^{mm},095$ de distance focale, on fondit un sou en 16 secondes. Le Père Kircher imagina le premier de substituer aux miroirs courbes un système de miroirs plans, disposés de manière à réunir en un même point et à une distance variable tous les rayons réfléchis. Plus tard, Buffon fit construire un appareil composé de 154 miroirs, avec lequel il enflamma des planches goudronnées à 50 mètres, et du sapin soufré à 83 mètres; avec un autre appareil composé de 224 miroirs il mit de l'argent en fusion à 13 mètres de distance. Il est très-probable d'après cela, que c'est par une combinaison de miroirs plans qu'Archimède parvint à brûler la flotte de Marcellus. On emploie fréquemment les miroir courbes, pour diriger la lumière des appareils d'éclairage dans l'espace qui doit être éclairé, et les miroirs paraboliques pour porter la lumière de leur foyer à une grande distance : les rayons réfléchis, étant sensiblement parallèles, franchissent une très-grande distance sans éprouver une grande diminution d'intensité. Cette disposition était autrefois employée dans les phares; mais on a remplacé les miroirs par des lentilles qui produisent beaucoup plus d'effet, comme nous le verrons plus loin.

1345. Nous avons déjà parlé des images qui se forment dans l'espace par la réflexion des miroirs courbes; nous avons vu qu'elles sont le lieu des foyers de tous les points de l'objet lumineux : elles ne sont visibles dans toutes les directions que quand on les reçoit sur un corps opaque, tel que du papier, de la poussière, de la fumée, etc. Les images que l'on voit dans les miroirs courbes, concaves ou convexes, sont aux points de concours des différents faisceaux de rayons qui sont reçus par l'œil. Si tous les rayons partis d'un même point de l'objet se réunissaient rigoureusement en un même point, l'image que l'on aperçoit serait exactement le lieu des foyers des points éclairants, et par conséquent elle coïnciderait avec l'image qui se forme dans l'espace. Mais nous avons vu qu'il n'en est pas ainsi, et que les rayons réfléchis par une surface quelconque se coupent sur deux surfaces conjuguées, que nous avons

désignées sous le nom de *caustiques :* par conséquent, c'est sur ces surfaces que se trouvent les images du point lumineux. De là, il est facile de conclure que, si par le centre de la pupille on mène une droite tangente aux deux surfaces caustiques, on aura le rayon qui forme l'axe du faisceau réfléchi qui revient à l'œil; les autres rayons en seront très-rapprochés, et se couperont sensiblement aux points de tangence du premier avec les deux surfaces. Si ces deux points sont placés de côtés différents par rapport à l'œil, l'image du point lumineux sera vue dans celui de ces points qui est en avant de l'œil; mais si les points de tangence sont tous deux en avant, la distance apparente devra être une combinaison des distances de ces deux points. Nous admettrons avec Newton, que le lieu de l'image partage en deux parties égales l'intervalle compris entre les deux points où l'axe commun des deux faisceaux touche les deux surfaces.

Il résulte de ce qui précède, que les images que l'on voit dans les miroirs courbes, diffèrent des images qui seraient le lieu des foyers de chacun des points lumineux; mais en général, elles en diffèrent peu, et l'on peut presque toujours les confondre sans erreur sensible, du moins quand les surfaces des miroirs n'ont qu'une petite étendue, relativement à celle de la surface de la sphère de même rayon. Ainsi, pour reconnaître les grandeurs, les formes et les positions des images, dans les différentes positions de l'objet, il suffira d'examiner dans les différents cas les positions des foyers.

1346. Considérons d'abord un miroir concave, et supposons que l'objet soit placé entre le miroir et le foyer principal (fig. 808) : il est facile de voir que l'image sera virtuelle, droite et plus grande que l'objet, d'autant plus que l'objet sera plus près du foyer principal. Si l'objet (fig. 809) est placé entre le foyer principal et le centre, l'image sera renversée et placée au delà du centre, et d'autant plus grande et plus éloignée que l'objet sera plus près du foyer principal. Si l'objet était placé au delà du centre (fig. 810), l'image serait renversée et placée entre le centre et le foyer principal. Quant aux images produites dans les miroirs convexes, il est facile de voir qu'elles seront toujours droites, virtuelles et plus petites que l'objet (fig. 811).

En désignant par Q la grandeur de l'objet, par Q' celle de l'image, par a la moitié du rayon du miroir, par p les distances des extrémités de l'objet au

miroir comptées sur les diamètres, et par p' celles des extrémités de l'image au miroir, on a évidemment

Dans le 1er cas (fig. 808), $O : O' :: 2a - p : 2a + p'$.
Dans le 2e cas (fig. 809), $O : O' :: 2a - p : p' - 2a$.
Dans le 3e cas (fig. 810), $O : O' :: p - 2a : 2a - p'$.
Dans le 4e cas (fig. 811), $O : O' :: 2a + p : 2a - p'$.

1347. Lorsqu'on se regarde dans un miroir courbe, les apparences varient suivant la distance à laquelle on se trouve du miroir; ce qui précède les explique facilement. A une distance du miroir plus petite que la distance focale principale, l'image est droite, et grossit à mesure qu'on s'éloigne; elle disparaît lorsqu'on arrive au foyer principal, et ne reparaît que quand on a dépassé le centre, attendu qu'entre le foyer principal et le centre, les foyers étant au delà du centre, l'œil ne reçoit que des faisceaux convergents qui ne peuvent pas produire d'images; au delà du centre, l'image reparaît, mais renversée et d'autant plus petite qu'on s'éloigne davantage.

1348. Les miroirs qui ne sont pas plans, déforment toujours les objets. Cette déformation est peu sensible dans les miroirs sphériques, qui n'occupent qu'un petit nombre de degrés; mais dans les miroirs cylindriques ou coniques, la déformation est très-grande, et par conséquent, des dessins d'une forme très-irrégulière peuvent produire des images régulières qui paraissent n'avoir aucun rapport avec les dessins.

1349. *Lentilles.* Les lentilles sont employées pour produire à leur foyer une haute température, par la concentration des rayons solaires. Si tous les rayons convergeaient exactement au même point, l'effet d'une lentille serait proportionnel à son étendue; mais l'aberration de sphéricité le diminue beaucoup. La plus forte lentille comburante qui ait été construite est celle de Parker : elle était en flint-glass, de 914 millimètres de diamètre, 82 d'épaisseur au centre, 2031 de distance focale; l'image solaire au foyer avait 25 millimètres; les rayons réfractés étaient reçus sur une seconde lentille de 330 millimètres de diamètre, de 41 millimètres d'épaisseur et de 737 millimètres de foyer : le diamètre de l'image solaire était réduit à 13 millimètres, et on parvint à fondre au foyer, l'or, le platine, le quartz, etc. La difficulté d'obtenir de grandes masses de verre assez pur, et de construire ces grandes lentilles, avait fait proposer par Buffon de construire les lentilles avec des bandes annulaires concentriques (fig. 812) formées chacune de plusieurs

pièces. On peut calculer la courbure des pièces annulaires, de manière que les rayons réfractés passent exactement par le même point. Les lentilles ainsi construites sont bien préférables aux lentilles d'une seule pièce et d'une seule courbure.

1350. Les lentilles sont aussi employées pour concentrer la lumière à leur foyer, et éclairer fortement les objets qui s'y trouvent placés : nous en verrons bientôt plusieurs exemples. Certains ouvriers se servent de boules de verre pleines d'eau pour concentrer la lumière sur une petite étendue.

1351. On fait aussi usage de lentilles pour porter la lumière à une grande distance, en plaçant le foyer de lumière au foyer principal de la lentille; mais pour cet objet, les lentilles à échelons sont bien préférables aux lentilles ordinaires. Fresnel a fait construire des phares avec des lentilles à échelons qui portent la lumière à une distance beaucoup plus grande que les anciens phares à miroirs : aussi, ces derniers ont été remplacés par des phares lenticulaires. Les phares construits par Fresnel consistent en huit grands verres lenticulaires carrés, formant par leur réunion un prisme octogone dont le centre coïncide avec le foyer commun des lentilles; en ce point est placée la lumière unique qui éclaire le phare; elle est produite par un bec de lampe à trois mèches concentriques, dans lequel un excès d'huile est injecté constamment par une pompe, et qui équivaut à 17 lampes de Carcel, pour la lumière et l'huile consommée; les rayons émanés de ce foyer sont rendus parallèles par les lentilles, et se propagent à une grande distance. L'appareil tourne uniformément sur lui-même : alors les faisceaux atteignent successivement un même point de l'horizon à des instants également éloignés les uns des autres; le nombre des éclipses qui se produisent dans le même temps est variable d'un phare à un autre, et sert à les faire reconnaître par les navigateurs. La lumière de ces phares est visible à une distance de 32,000 mètres. Avec une lampe quadruple, MM. Arago et Mathieu l'ont aperçue de jour, avec une lunette, à une distance de 70 kilomètres; une heure après le coucher du soleil on l'apercevait à l'œil nu. Le phare d'Agde a été vu du mont Béarn, près de Port-Vendres, à une distance de 90 kilomètres; sur les montagnes il doit être aperçu quelques kilomètres plus loin.

1352. *Microscopes simples.* Les microscopes simples sont des lentilles convergentes d'un court foyer, qui servent à examiner les objets de très-petites dimensions, en augmentant beaucoup leur

diamètre apparent. Pour comprendre l'effet de ces lentilles, il faut se souvenir, que de petits objets ne peuvent être vus avec netteté qu'autant qu'ils sont placés à une distance de l'œil égale à la distance de la vision distincte, et que, si par un moyen quelconque on parvenait à les voir distinctement beaucoup plus près de l'œil, leur diamètre apparent augmenterait à mesure que leur distance à l'œil diminuerait; et, comme en même temps, la quantité de lumière qu'ils enverraient à la pupille augmenterait dans le même rapport que le grossissement, leurs images, quoique grossies, seraient toujours également éclairées. Or, il est facile de voir que cette condition peut toujours être remplie par une lentille convergente placée entre l'œil et l'objet, de manière que l'objet soit en avant de la lentille d'une quantité un peu plus petite que sa distance focale principale : car alors les rayons en la traversant deviendront moins divergents, et la lentille pourra toujours être placée de manière que les rayons émergents, prolongés, forment leurs foyers à la distance de la vue distincte; par conséquent, l'objet sera vu à cette distance, sous un diamètre apparent d'autant plus grand que l'objet sera plus près de l'œil (fig. 813). En négligeant la distance de l'œil à la lentille, ainsi que la distance de l'objet au foyer principal de la lentille, le grossissement sera mesuré par le rapport de la distance de la vision distincte à la distance focale principale de la lentille : car l'objet *ab* est vu à travers la lentille sous l'angle *aob*, tandis que, s'il était placé à la distance de la vue distincte, on le verrait sous l'angle *ao'b* : ainsi le grossissement est dans le rapport de *o'f* à *of*, c'est-à-dire dans le rapport de la distance de la vision distincte à la distance focale principale de la lentille. Par exemple, en prenant 125 millimètres pour la distance la plus convenable à la vision des petits objets, pour obtenir des grossissements 5, 50, 500, les distances focales des loupes devront être 25^m; $2^{mm},5$ et $0^{mm},25$. On voit d'après cela que le grossissement d'une même lentille n'est pas le même pour tous les individus : il est plus grand pour les presbytes que pour les myopes.

1353. On pourrait évidemment produire l'effet des lentilles, en plaçant devant l'œil une feuille de papier mince, opaque et percée d'un très-petit trou. Le faisceau qui pénétrerait dans l'œil, étant très-fin, produirait une image assez nette de l'objet, grossie comme avec une lentille, mais peu distincte, parce qu'elle serait peu éclairée.

1354. On obtient de très-bonnes loupes d'un court foyer, en

mettant une goutte d'eau sur une plaque de verre, ou dans un petit trou pratiqué dans une lame de métal; ou, en plaçant un fragment de verre, sur un très-petit trou pratiqué dans une lame mince de platine et fondant le verre à la flamme d'un chalumeau : le verre prend sur chaque face une forme sensiblement sphérique et reste adhérent aux bords de l'orifice.

1355. Il est toujours avantageux de monter les loupes au centre d'un petit miroir métallique concave, dirigé vers l'objet, et dont la distance focale principale est la même que celle de la loupe, afin d'augmenter la lumière de l'objet.

1356. Les pierres précieuses, telles que le diamant, le grenat, ayant un pouvoir réfringent, beaucoup plus grand que le cristal, on a essayé d'en faire des lentilles : sous la même courbure elles produisent un plus fort grossissement que celles de cristal; mais les difficultés que présente le travail des pierres dures, et leur cristallisation qui produit des modifications particulières dans les rayons qui les ont traversées, les ont fait abandonner pour la construction des lentilles.

1357. On doit à M. Brewster une méthode très-simple pour employer les lentilles planes-convexes, qui donne le même grossissement qu'une lentille biconvexe de même courbure. Il suffit (fig. 815) d'observer l'objet par réflexion sur la surface plane : la convergence des rayons incidents s'ajoute à celle des rayons émergents, et l'effet est le même que si la lentille était biconvexe et que l'on observât par transmission.

1358. On peut voir à travers une lentille un objet placé à une distance de la lentille plus grande que sa distance focale principale. La lentille forme alors derrière elle une image réelle, mais renversée, de l'objet (fig. 816), et l'œil doit évidemment se trouver au delà, sur l'axe de la lentille et à une distance égale à la distance de la vision distincte. Il est facile de voir que l'image est d'autant plus grande que l'objet se trouve plus près du foyer principal de la lentille, et qu'en désignant par p et p' les distances de l'objet et de son image à la lentille, le grossissement est dans le rapport de p' à p.

Quant aux lentilles divergentes, l'image sera toujours plus petite que l'objet, et située du même côté de la lentille (fig. 817).

1359. Les microscopes simples déforment toujours les objets à cause de l'aberration de sphéricité. On diminue cet inconvénient au moyen d'un diaphragme, qui ne laisse pénétrer dans la lentille que

les rayons qui rencontrent sa surface près du centre; mais les images sont moins éclairées et moins distinctes. Wollaston a imaginé, pour détruire l'aberration de sphéricité, une disposition qui n'a pas l'inconvénient que nous venons de signaler. La lentille est formée de deux lentilles planes-convexes (fig. 814), appliquées contre une lame métallique très-mince, percée d'un petit orifice ayant pour diamètre un cinquième de la distance focale principale; par cet arrangement, les rayons traversant la lentille à une petite distance du centre font leur foyer au même point; et le nombre des rayons transmis est beaucoup plus considérable que si le diaphragme était en avant. Plus tard Wollaston reconnut qu'il serait plus avantageux de placer les faces planes des lentilles d'un même côté. Le microscope simple de Wollaston porte le nom de *doublet;* il est représenté fig. 1027, tel que le construit M. Charles Chevallier, qui y a introduit quelques perfectionnements de détail; A et B sont deux lentilles de même foyer, planes-convexes, dont les surfaces planes sont tournées vers l'objet; elles sont séparées par un diaphragme *d*.

Pour l'usage des anatomistes, la lentille est fixée à une tige horizontale qui se meut le long d'une tige verticale; au-dessous de la lentille se trouve une glace, sur la quelle on place les objets, qui sont éclairés par un miroir.

1360. *Chambre obscure.* Si l'on pratique au volet d'une chambre obscure un petit orifice, on verra sur le mur opposé au volet une image renversée des objets extérieurs, et cette image sera d'autant plus nette, mais d'autant moins éclairée, que l'orifice aura un plus petit diamètre. Cet effet provient évidemment de ce que chaque point lumineux éclaire le mur par un faisceau d'un petit diamètre, et de ce que les images de chaque point sont d'autant plus nettes qu'elles sont plus petites. Mais, si l'on pratique dans le volet un grand orifice, et qu'on y introduise une lentille convergente, en plaçant à la distance convenable un carton ou un verre dépoli, on y verra une image renversée très-nette des objets extérieurs; et si l'on recevait la lumière sur un miroir avant ou après son passage à travers la lentille, l'image sur l'écran serait évidemment droite. Cet appareil porte le nom de *chambre obscure.* Les chambres obscures varient beaucoup dans leurs formes et leur grandeur suivant l'objet auquel on les destine. Les figures 818 et 819 représentent les dispositions les plus ordinaires. Dans la première on reçoit l'image sur un carton, pour en tracer les contours. *ab*

est un miroir sur lequel les rayons viennent d'abord se réfléchir avant de traverser la lentille *cd;* on fait varier l'inclinaison du miroir au moyen de la tige *pq;* ABCD est une caisse en bois, noircie intérieurement, au fond de laquelle se trouve le carton sur lequel l'image vient se peindre; elle est percée latéralement d'une ouverture *mn,* par laquelle l'observateur introduit la partie supérieure de son corps; au-dessus du point *m* se trouve un rideau que l'observateur fait passer derrière lui pour intercepter la lumière étrangère qui troublerait la netteté des images. Le tuyau qui porte la lentille est mobile, afin qu'on puisse la placer à la hauteur convenable pour que le foyer soit sur BC. Quelquefois la partie latérale de la caisse est remplacée par un rideau qui descend jusqu'à terre, et enveloppe complétement une table circulaire qui peut se placer à différentes hauteurs; c'est dans l'intérieur de ce rideau que se place l'observateur. Dans la fig. 819, les rayons, après avoir traversé la lentille *cd,* se réfléchissent sur le miroir *ab,* et l'image se forme sur un verre dépoli *ef; mn* est une petite planche garnie latéralement de joues, que l'observateur élève à la hauteur convenable, et qui est destinée à empêcher la lumière étrangère d'arriver sur le verre dépoli.

L'appareil que nous venons de décrire renferme une grave imperfection : si l'on fait varier la distance de la lentille à l'écran, de manière que l'image soit très-nette au centre, elle ne l'est plus sur les bords, et réciproquement. Cela tient à ce que les distances focales des rayons qui traversent obliquement la lentille étant d'autant plus petites que les rayons sont plus obliques, l'écran n'est pas placé au foyer de tous les systèmes de rayons; l'effet serait encore évidemment le même si les distances focales étaient indépendantes de l'inclinaison des rayons. Wollaston a évité cet inconvénient en employant une lentille concave-convexe, dont la concavité est tournée du côté du miroir (fig. 818) : car dans ces espèces de lentilles les distances focales croissent avec l'inclinaison des rayons. On conçoit alors qu'on peut, par tâtonnement, trouver le rapport des courbures des deux surfaces de manière que les foyers se fassent tous sensiblement sur l'écran, du moins dans une certaine limite d'inclinaison. Wollaston avait donné d'abord pour le rapport le plus convenable des courbures des deux verres celui de 2 à 1; mais, depuis, M. Cauchois a trouvé que le rapport le plus avantageux était celui de 8 à 5.

La chambre obscure ainsi perfectionnée par Wollaston avait

encore un inconvénient : si l'on employait pour miroir une glace étamée, on avait plusieurs réflexions qui altéraient la netteté de l'image; si l'on employait des miroirs métalliques, on obtenait moins de lumière, et ces miroirs exposés à l'air s'altéraient facilement. M. Ch. Chevalier, opticien, a obvié à ces inconvénients en remplaçant la lentille et le miroir par un prisme de verre (fig. 820), dont les faces AC et CB sont, l'une convexe, l'autre concave : la lumière qui pénètre dans le prisme éprouve une réflexion totale sur la face AB, et elle reçoit à son entrée et à sa sortie le même degré de convergence que si elle traversait une lentille ayant les courbures des faces AC et BC du prisme. Le prisme est placé dans une boîte en cuivre, noircie intérieurement et garnie d'une fenêtre, de manière qu'on puisse lui donner le degré convenable d'inclinaison, et la boîte est placée sur un disque de bois soutenu par trois pieds; une étoffe noire, fixée supérieurement dans la gorge du disque de bois et descendant jusqu'à terre, forme une enveloppe dans laquelle se place l'observateur.

1361. *Images daguerriennes.* Les images de la chambre noire, si remarquables par la netteté des contours et la dégradation des teintes, ont été fixées par MM. Niepce et Daguerre en 1839. Bien avant cette époque, la solution de cet important problème avait exercé la sagacité d'un grand nombre de physiciens.

Les épreuves sont obtenues sur des feuilles d'argent plaquées sur cuivre. D'après M. Daguerre, l'ensemble des deux métaux est nécessaire pour le succès de l'opération; c'est supposer l'intervention d'une action électrique dont la nature n'est pas encore déterminée.

La première opération est le polissage de la plaque. Il s'effectue au moyen de tampons de coton, saupoudrés de tripoli, de ponce ou de rouge d'Angleterre. Ces corps pulvérulents doivent être de la plus grande ténuité : on promène le tampon sur la plaque dans différents sens; avec de l'habitude, on fait disparaître les raies et l'on donne à la plaque un bruni parfait. On polit encore, mais au commencement de l'opération seulement, avec de l'huile, de l'essence de lavande, etc. Enfin M. Daguerre a conseillé de répandre sur la plaque, après un premier poli, une couche légère de tripoli, et de frotter sa surface au moyen d'un tampon imprégné d'une solution faible d'acide azotique. Après dessiccation complète, on recommence le polissage avec du tripoli très-fin et bien desséché. On n'apportera jamais trop de soins à cette première opéra-

tion; pour peu qu'elle laisse à désirer, l'épreuve obtenue sera imparfaite.

La plaque polie est exposée aux vapeurs que laisse dégager l'iode à la température ordinaire. Elle prend bientôt une teinte jaune très-brillante à laquelle succède une teinte rouge; il faut à ce moment soustraire la plaque à l'influence des vapeurs, en fixant la planchette qui la supporte dans un châssis rectangulaire en bois dont la face opposée porte un écran, mobile à frottement dans une coulisse. Par cette disposition, la couche sensible d'iodure d'argent se trouve soustraite à l'influence de la lumière.

La planche ainsi préparée peut servir immédiatement à la production d'une image, si toutefois il ne s'agit pas d'un portrait; dans ce cas, il faut lui donner plus de sensibilité en l'exposant pendant un temps qui varie de 30″ à 1′ aux vapeurs qui se dégagent d'une très-faible solution aqueuse de brome. C'est à M. Fiseau que l'on doit l'emploi très-avantageux du brome, comme moyen accélérateur. On obtient encore des résultats très-satisfaisants, peut-être même plus certains, par l'emploi du chlorure ou du bromure d'iode.

La chambre noire est rectangulaire, et l'image se forme sur le fond vertical. L'objectif doit être achromatique et, autant que possible, exempt d'aberration de sphéricité. Avec un objectif simple, il est nécessaire de diaphragmer l'instrument, c'est-à-dire de n'employer que le milieu de la lentille. Il est plus avantageux de se servir d'un objectif composé de deux lentilles achromatiques; leur système rend plus courte la distance focale et permet d'obtenir une image mieux éclairée. L'objectif de M. Lerebours, représenté fig. 1028, se compose de deux systèmes de lentilles, dont l'un est mobile au moyen d'une crémaillère et d'un pignon.

Après avoir disposé la chambre noire de manière qu'une image nette se produise sur le verre dépoli, on substitue au châssis qui le porte celui qui renferme la plaque; ces deux châssis doivent être construits de telle sorte, que l'image qui se dessinait sur le verre dépoli, vienne se former sur la plaque au moment où l'on soulèvera la planchette antérieure qui la préserve de l'action de la lumière. Après un temps variable, d'une fraction de seconde à plusieurs minutes, suivant la nature de la couche sensible, l'éclairement et la couleur de l'objet, la disposition de l'objectif, la plaque est soustraite à l'influence de la lumière. Elle ne présenterait à l'observation aucun changement apparent; mais si on l'expose à

l'action de vapeurs mercurielles en la plaçant, sous une inclinaison de 45°, à la partie supérieure d'une boîte, au fond de laquelle est une capsule de fer pleine de mercure, que l'on chauffe au moyen d'une lampe à alcool, jusqu'à ce que l'on aperçoive les premières traces du dessin, l'image ne tarde pas à être complète. Un carreau de verre placé à la partie antérieure de la boîte permet de surveiller l'opération. Le mercure adhère à la plaque en globules microscopiques, se dépose en plus grande quantité sur les parties de l'image qui ont été fortement éclairées que sur celles qui recevaient peu de lumière, et laisse intactes celles qui se trouvaient dans l'ombre, à moins que l'on n'ait trop chauffé le mercure, ou que l'action des vapeurs mercurielles ait été de trop longue durée.

Après cette quatrième opération, on enlève la couche sensible en plongeant la plaque dans une solution d'hyposulfite de soude, à laquelle on ajoute avec avantage une certaine quantité d'alcool (M. de Brebisson). Par une immersion plus ou moins longue, si la solution est faible, de très-courte durée, si elle est concentrée ou alcoolisée, la plaque a perdu la teinte rose qu'elle possédait; mais la plus légère friction suffit pour altérer l'épreuve : ce qui tend à prouver que le mercure n'a pas formé un amalgame avec l'argent.

M. Fiseau est parvenu à fixer l'image en chauffant à la surface de la plaque une couche d'une solution faible de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude. « Dans cette opération, de l'argent se dissout, et de l'or se précipite sur l'argent et sur le mercure, mais avec des résultats bien différents : l'argent qui, par son miroitage, forme les noirs des tableaux, est en quelque sorte bruni par la mince couche d'or qui le couvre, d'où résulte un renforcement dans les noirs. Le mercure, au contraire, qui a l'état de globules infiniment petits, forme les blancs, augmente de solidité et d'éclat par son amalgame avec l'or, d'où il résulte une fixité plus grande et un remarquable accroissement dans les lumières de l'image. » L'épreuve est donc fixée par un véritable procédé de dorure, par la dorure au trempé. M. Lerebours a employé la pile dans cette opération; les résultats qu'il a obtenus sont très-remarquables.

1362. *Daguerréotype panoramique de M. Martens.* « Ce qui caractérise le nouveau perfectionnement apporté au daguerréotype, c'est qu'il permet de faire, avec un objectif de petite dimension, des épreuves d'une grande étendue longitudinale et d'une netteté parfaite. Ainsi, avec un objectif *un quart double* ordinaire, on obtient des vues

38 centimètres de long sur 12 de large, parfaitement nettes sur toute cette surface, et embrassant un angle visuel de plus de 150°.

« Le procédé par lequel on arrive à ce résultat consiste essentiellement : 1° dans un mouvement horizontal donné à l'objectif, et qui lui fait parcourir successivement tous les points de l'horizon; 2° dans la courbure cylindrique que la feuille de plaqué est forcée de prendre au moyen d'arrêts que l'on dispose à volonté : on amène ainsi les foyers des objets les plus inégalement distants à la surface de la plaque métallique; 3° la netteté remarquable des épreuves est due en outre à une fente étroite verticale ménagée au fond d'une espèce de boîte qui suit l'objectif dans son mouvement. Cette fente, qui joue le rôle d'un diaphragme que l'on placerait en arrière, ne laisse agir sur la couche sensible que les rayons centraux, c'est-à-dire ceux qui n'ont aucune aberration appréciable.

« Il est essentiel que la position de l'axe de rotation de l'objectif soit déterminée avec une exactitude parfaite, sans cela les images des objets vers lesquels l'appareil se dirige successivement, avant de s'éteindre et de faire place à celles qui leur succèdent, se meuvent sur le verre dépoli et, par conséquent, aussi sur la plaque; toute netteté est alors impossible. On obtient la position convenable de l'axe par rapport à l'objectif en enfonçant plus ou moins le tube qui porte celui-ci, jusqu'à ce que la condition d'immobilité des images soit parfaitement remplie. » (*Comptes rendus des séances de l'Académie.*) Par ce procédé, MM. Lerebours et Sécretan ont obtenu des vues d'une netteté remarquable.

Les images de la chambre noire étant renversées, les parties à droite d'un monument seront à gauche sur l'épreuve. On peut éviter cet inconvénient en redressant l'image au moyen d'un prisme rectangle placé en avant de l'objectif. M. Charles Chevalier a conseillé d'étamer la face hypoténuse de ce prisme. Il est facile de comprendre l'avantage du prisme rectangle sur une glace à faces parallèles inclinée à 45° sur l'axe de l'instrument : une glace étamée ayant deux surfaces réfléchissantes. Les miroirs métalliques sont d'un prix trop élevé, et leur altération serait trop prompte dans un appareil qui peut émettre des vapeurs d'iode. Quant aux détails des manipulations, aux très-nombreuses précautions qui assurent le succès, à la couleur des vêtements et la disposition du modèle, quand il s'agit de faire un portrait, nous renvoyons aux traités spéciaux de MM. Daguerre, Lerebours, Ch. Chevalier, etc.

Nous ne devons pas passer sous silence un fait très-curieux dé-

couvert par M. E. Becquerel. On soumet une plaque préparée avec soin à l'action de l'image focale de la chambre noire, mais pendant un temps trop court pour que l'image daguerrienne puisse se produire par les vapeurs mercurielles; on l'expose ensuite aux rayons solaires qui ont traversé un verre rouge, pendant un temps convenable, elle devient alors propre à recevoir ces vapeurs, et l'image se produit. Elle apparaît même sans mercure, en prolongeant l'action du verre rouge; mais les épreuves obtenues ainsi sont loin d'avoir la vigueur des épreuves ordinaires. M. E. Becquerel, en partant de ce fait, qu'il avait découvert en opérant sur des papiers sensibles, a distingué les rayons chimiques du spectre en rayons excitateurs et rayons continuateurs; M. Gaudin a reconnu que cette distinction s'appliquait aux épreuves daguerriennes.

M. Talbot et plusieurs autres physiciens ont préparé des papiers imprégnés de différentes substances qui prennent des teintes plus ou moins foncées par l'action de la lumière, et conservent l'empreinte des images qui se forment dans la chambre noire. Nous renvoyons aux traités de photographie pour la préparation de ces papiers : nous dirons seulement que M. Bayard a obtenu des résultats très-remarquables; mais il n'a point fait connaître son procédé; que plus récemment M. Blanquart-Évrard a présenté à l'Académie des sciences des épreuves sur papier d'une netteté parfaite, en annonçant l'intention de publier son procédé.

Expériences de M. Moser. Lorsqu'une plaque iodée est restée pendant un temps convenable dans la chambre obscure, on obtient des images immédiatement visibles, sans avoir besoin de soumettre la plaque aux vapeurs mercurielles. Mais cette image est inverse, c'est-à-dire que les clairs sont représentés en noir, et réciproquement. Dans les expériences de M. Daguerre, on n'attend pas que cet effet soit produit. D'après les expériences de M. E. Becquerel, un temps très-court suffit pour commencer l'empreinte directe, qui devient plus marquée par l'action des rayons solaires traversant un verre rouge. M. Moser a vérifié les faits que nous venons de citer, et a constaté que l'action prolongée du verre rouge rendait l'image inverse.

M. Gaudin avait remarqué que les verres jaunes sont plus efficaces que les verres rouges, et avait annoncé qu'une plaque iodée, exposée dans la chambre noire, un temps suffisant pour donner des images par la vapeur mercurielle, étant ensuite exposée au soleil sous un verre jaune, produisait une image visible d'une grande

netteté sans l'emploi de la vapeur mercurielle. M. Moser a confirmé ces faits, et a reconnu qu'ils ne se produisaient jamais sous un verre rouge, et qu'une plaque iodée laissée pendant une heure dans la chambre noire, de manière à présenter une image inverse, étant exposée ensuite en plein soleil pendant quelques minutes, l'image inverse disparut et fut remplacée par une image directe. Des plaques iodées, laissées pendant treize jours dans la chambre noire, ont donné des images positives d'un très-bel effet. La lumière polarisée n'agit pas différemment que la lumière ordinaire.

On sait depuis longtemps, que si l'on écrit avec certaines substances sur une glace bien polie, et qu'ensuite on efface les caractères en nettoyant complétement la surface, les caractères reparaissent quand on y projette de l'humidité par le souffle de l'haleine. M. Moser a reconnu que ce phénomène se présentait pour tous les corps polis. On l'observe également en plaçant sur une plaque polie un écran découpé, et projetant ensuite l'haleine sur l'écran; la vapeur d'eau condensée sur les parties de la plaque non préservée par l'écran étant évaporée, en soufflant de nouveau l'haleine sur la plaque, on reconnaît la place qui était occupée par l'écran.

M. Moser a constaté que les vapeurs d'iode et de mercure sont très-propres à la manifestation de ces images : des médailles métalliques et non métalliques ayant été placées sur une plaque d'argent iodée, et ensuite enlevées, on reconnaissait quelquefois immédiatement la place qu'elles avaient occupée; mais, en soumettant la plaque aux vapeurs de mercure, l'image était assez nette pour qu'on pût reconnaître facilement les lettres et les figures. Ces expériences réussissent aussi bien dans l'obscurité que sous l'influence de la lumière. Une plaque iodée, qui ne présentait aucune image après l'enlèvement de l'objet, fit voir une empreinte de la plus grande netteté quand elle fut exposée à la lumière diffuse ou au soleil. On obtient même une image sensible sur une plaque métallique non iodée en l'exposant, après le contact de l'objet, à la vapeur mercurielle. Une plaque d'argent fut iodée dans l'obscurité, on plaça dessus une médaille, une plaque métallique gravée, un anneau en corne, etc.; la plaque fut ensuite soumise aux vapeurs mercurielles, et on vit apparaître les images parfaitement nettes des objets qui avaient été mis en contact avec la plaque. La lumière diffuse et la lumière solaire agissent de la même manière que la vapeur mercurielle : une plaque d'argent couverte d'un écran noir découpé ayant été exposée pendant plusieurs jours à la lumière

solaire, les vapeurs mercurielles firent paraître les découpures de l'écran. Avec une plaque de cuivre et de la vapeur d'iode, on obtient les mêmes résultats, qu'avec une glace et l'haleine; ces expériences ont été faites dans une obscurité complète.

M. Breguet avait eu souvent l'occasion d'observer en dedans de la seconde boîte des montres, l'image renversée et très-distincte du nom gravé sur la première.

Le célèbre sculpteur Rauch avait vu sur une glace, qui avait recouvert pendant un grand nombre d'années une gravure, et sans être en contact avec elle, l'image de cette gravure. M. Moser a répété ces expériences; il obtient des images dans l'obscurité en deux jours : la glace a une teinte plus blanche dans les parties altérées; l'image est la même quand elle a été formée au contact ou à une petite distance. M. Moser a obtenu les mêmes images en cinq jours sur des plaques de cuivre, de laiton, de zinc et d'or. Ces images se détruisent facilement par le frottement.

En plaçant une médaille sur une plaque de verre, au-dessous de laquelle se trouvait une plaque métallique, M. Karsten a reconnu qu'il se forme une image sur la surface supérieure du verre, lorsqu'on fait tomber l'étincelle d'une machine électrique sur la médaille. Si la médaille repose sur plusieurs plaques de verre, et que la dernière soit en contact avec une plaque métallique, il se produit des images à la surface supérieure de toutes les plaques de verre, mais qui vont en s'affaiblissant à mesure que les plaques sont plus éloignées de la médaille. Ces images deviennent visibles en exposant les plaques au souffle le plus léger. M. Masson a obtenu des images analogues au moyen de l'étincelle électrique, mais par un autre procédé [922].

M. Moser attribue les images dont nous venons de parler à l'action de la lumière obscure; M. Fizeau, à une légère couche de matière organique, analogue aux corps gras et volatils dont la surface des corps est recouverte; MM. Pogendorf et Knarr à la chaleur; mais aucune de ces explications n'est satisfaisante. Avant de chercher la cause de ces singuliers phénomènes, il faudrait d'abord connaître les circonstances essentielles à leur production.

1363. *Mégascope.* Si l'on place dans le volet d'une chambre obscure une lentille convergente (fig. 821), et devant la lentille, à une distance plus grande que sa distance focale principale, un objet éclairé par des rayons solaires directs ou réfléchis, il se formera dans la chambre une image renversée que l'on pourra recevoir sur

un écran, et dont la grandeur dépendra de la distance de l'objet à la lentille et de la distance focale de la lentille; si l'objet était lui-même renversé, il est évident que l'image serait droite. En employant une lentille achromatique et un grossissement de 2 à 20, on obtient des images très-nettes. Cet instrument peut alors être utile dans les recherches de physique et d'histoire naturelle; il a été inventé par Charles.

1364. *Lanterne magique.* La lanterne magique est fondée sur le même principe que le mégascope. Des objets peints sur une lame de verre sont fortement éclairés par une lampe dont la lumière est réfléchie par un miroir, ou concentrée par une grande lentille à foyer très-court; au delà de la lame de verre, et à une distance plus grande que sa distance focale principale, se trouve une lentille convergente, qui forme sur un tableau, une image amplifiée et renversée des objets peints sur la lame de verre. Les images sont évidemment droites quand les objets peints sur la lame de verre sont eux-mêmes renversés.

1365. *Fantasmagorie.* La fantasmagorie n'est autre chose qu'une lanterne magique, dans laquelle on peut changer la distance de l'objet au verre convergent et de ce verre au tableau : on obtient alors des images dont la grandeur varie entre des limites très-étendues, et qui paraissent s'approcher ou s'éloigner. Les images se forment sur une grande toile tendue dans un cadre; d'un côté se trouvent les spectateurs, de l'autre la lanterne magique, montée sur un chariot, que l'on éloigne ou qu'on rapproche successivement du tableau, en faisant varier en même temps la distance de l'objet à la lentille, de manière que cette distance soit celle du foyer conjugué correspondante à celle du tableau. Et, comme il est important pour l'illusion, que la lumière de l'image éprouve les mêmes variations que sa grandeur, on place dans l'intérieur de la lanterne un diaphragme mobile destiné à rétrécir le faisceau de lumière qui éclaire l'objet à mesure que l'image devient plus petite.

1366. *Microscope solaire.* Cet instrument ne diffère du mégascope qu'en ce qu'il est destiné à observer des objets de très-petites dimensions. Il est formé d'un miroir *mn* (fig. 822), auquel on peut donner une direction déterminée à l'aide de deux mouvements rectangulaires, et de deux tuyaux A et B renfermant chacun un système de lentilles : l'un sert à concentrer les rayons solaires sur deux lames de verre *p, q,* renfermant entre elles les petits objets dont on veut avoir une image amplifiée; l'autre, placé à une distance

convenable de *pq* projette, sur un écran placé au foyer conjugué, une image grossie des objets renfermés entre les deux lames de verre. La figure représente un microscope solaire construit par M. Soleil. Ce qui précède et l'inspection de la figure feront facilement comprendre l'usage des pièces qui le composent.

1367. M. Gally-Cazalat a imaginé de substituer aux rayons solaires, la lumière qui se dégage d'un cylindre de carbonate de chaux sur lequel on dirige un jet enflammé d'hydrogène et d'oxygène, dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau : la chaux réduite prend un éclat extraordinaire et projette sur l'objet, à l'aide d'une lentille, une lumière si vive, qu'on peut obtenir un grossissement considérable avec une grande netteté dans l'image. Pour éviter les chances d'explosion, il faudrait employer la disposition indiquée [756].

MM. Donné et Foucault ont employé avec beaucoup plus d'avantages la lumière, plus brillante encore, que produit le passage d'un courant électrique dans l'intervalle de deux cônes de charbon [1106]. Les effets obtenus sont comparables à ceux qu'on obtient avec le microscope solaire (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1845).

1368. Les instruments dont nous allons parler, le microscope composé et les lunettes, sont formés de deux lentilles ou de deux systèmes de lentilles : l'un porte le nom d'*objectif*, l'autre celui d'*oculaire*. Le premier reçoit les rayons de l'objet et forme derrière lui une image que l'on regarde avec une ou plusieurs loupes qui constituent l'oculaire. Ces lentilles doivent toujours être placées sur le même axe, solidement assujetties dans un tuyau formé de plusieurs pièces qui peuvent glisser les unes dans les autres, afin de faire varier la distance de l'oculaire à l'objectif; ce tuyau est noirci intérieurement, afin d'absorber les rayons obliques qui viennent frapper sa surface; on place même dans l'intérieur du tuyau des diaphragmes circulaires noircis pour arrêter les rayons qui sont trop inclinés sur l'axe.

1369. *Microscope composé.* Cet appareil se compose (fig. 823) d'une petite lentille A, d'un très-court foyer, au devant de laquelle on place un très-petit objet *mn*, à une distance plus grande que la distance focale principale A*a* : il se forme derrière la lentille une image renversée et amplifiée *m'n'*, que l'on regarde avec l'oculaire B, placé de manière que sa distance à l'image soit un peu plus petite que la distance focale principale de la lentille; on aperçoit alors

une image $m''n''$ beaucoup plus grande. Mais pour que cette image soit nette, il faut qu'elle soit à la distance de la vue distincte : on satisfait à cette condition en faisant varier la distance de l'oculaire à l'objectif. Il est facile de reconnaître que, dans ces instruments, le grossissement total est égal au produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire; et que, toutes choses égales d'ailleurs, le grossissement varie avec la distance de la vue distincte de l'observateur.

1370. L'instrument que nous venons de décrire renferme une imperfection, d'autant plus grave que le grossissement est plus considérable : c'est le défaut d'achromatisme des verres, car il en résulte que l'image $m'n'$, et par suite l'image $m''n''$, est bordée de franges irisées qui en rendent les contours très-confus. On est parvenu à faire disparaître en partie cet inconvénient par une lentille intermédiaire. Pour comprendre comment cette lentille peut produire un achromatisme partiel, il faut remarquer que les images de différentes couleurs qui se forment derrière une lentille sont parallèles, à différentes distances et d'inégales largeurs, et que les franges ont pour largeur la différence du diamètre apparent des plus grandes et des plus petites : d'où il suit que, si l'on pouvait les apercevoir sous le même angle, elles se superposeraient, et les franges disparaîtraient. Pour faire voir que cette dernière circonstance peut être réalisée par une lentille placée entre l'objectif et l'oculaire, considérons un objet mn (fig. 824) éclairant une lentille ab : les rayons de différentes couleurs iront former des images vv, rr, et les plus éloignées appartiendront aux rayons rouges. Supposons maintenant que les rayons soient reçus sur une seconde lentille $a'b'$ placée en avant des images colorées : les rayons iront se réunir sur les lignes $o'v$, $o'r$, en des points v', r', et les points $v'v'$ seront plus rapprochés de la lentille $a'b'$ que les autres; alors si le centre de la dernière lentille est sur la ligne $v'r'$, il est évident que les franges disparaîtront complétement. On peut placer la nouvelle lentille au delà de l'image formée par l'objectif : l'effet produit est le même, comme on peut s'en assurer à l'inspection de la fig. 825. Cette disposition est plus avantageuse que la première, quand l'instrument renferme un micromètre placé au lieu de l'image de l'objectif, parce qu'alors le micromètre peut être fixe, tandis que dans la première disposition il devrait se mouvoir avec le dernier oculaire, et pourrait éprouver des dérangements.

Dans les microscopes, la lentille intermédiaire a encore pour objet de rassembler les rayons trop obliques qui ne tomberaient pas sur l'oculaire, et par suite d'augmenter l'éclat de l'image et l'étendue du champ.

1371. Malgré cette lentille intermédiaire, les images n'ont pas la netteté désirable, et ce n'est que depuis qu'on est parvenu à construire des objectifs achromatiques d'un très-court foyer que le microscope composé a atteint un haut degré de perfection. La construction de ces lentilles, à cause de leur petitesse, présentait beaucoup de difficultés : c'est principalement à M. Amici, au docteur Goring, et à M. Ch. Chevalier qu'on doit ce dernier perfectionnement des microscopes. L'objectif des microscopes se compose maintenant de plusieurs lentilles achromatiques de 9 à 10 millimètres de foyer, superposées, et qui produisent le même effet qu'une seule lentille d'un foyer beaucoup plus court, mais qu'il serait impossible d'achromatiser à cause de ses petites dimensions. Chacune de ces lentilles est composée d'une lentille biconvexe de crown-glass et d'une lentille plane-concave de flint-glass. Les oculaires sont également achromatiques.

1372. Dans les microscopes dont nous venons de parler, l'axe optique étant ordinairement vertical, la position que doit conserver l'observateur est fatigante. M. Amici a imaginé une disposition très-ingénieuse qui permet de placer l'appareil horizontalement, elle est indiquée fig. 826. *mn* est l'objet, AB l'objectif achromatique, CDE un prisme de verre dont le côté CD renvoie les rayons horizontalement; les lentilles oculaires sont disposées comme dans les microscopes verticaux.

1373. On doit aussi au même physicien un microscope fondé sur d'autres principes; la disposition de cet appareil est représentée fig. 827. Il se compose d'un tube de cuivre horizontal, dont le fond est garni d'un miroir elliptique AB, et l'autre extrémité, des verres oculaires C, D; en avant du miroir métallique et à son foyer le plus voisin, se trouve un miroir plan incliné à 45°; au-dessous de ce miroir le tuyau est percé d'une ouverture par laquelle arrivent les rayons émanés de l'objet *mn;* ces rayons se réfléchissent sur le miroir plan, et, après avoir éprouvé une nouvelle réflexion sur le miroir elliptique, se réunissent à son autre foyer; ils y forment une image *m'n'* qu'on regarde directement avec un système d'oculaires disposés à la manière ordinaire. La forme elliptique du miroir a pour objet d'éviter l'aberration de sphéricité. Mais la con-

struction des miroirs elliptiques présente de grandes difficultés, ils s'altèrent facilement, et on ne peut augmenter le grossissement que par les oculaires, circonstance qui produit une grande déperdition de lumière. Ces instruments sont abandonnés depuis qu'on est parvenu à faire de bonnes lentilles achromatiques à court foyer.

1374. Dans tous les microscopes qu'on construit maintenant, l'objectif est composé de plusieurs lentilles achromatiques d'un très-court foyer : on emploie différens systèmes, suivant le grossissement qu'on veut obtenir ; l'intérieur du tube est couvert d'une couleur noire mate, afin d'éviter toute réflexion intérieure. Lorsque les objets que l'on veut soumettre à l'expérience sont transparents, on les place dans une goutte d'eau renfermée entre deux lames de verre ; on peut aussi placer l'objet sur une seule lame de verre, mais son image est moins nette ; l'objet est alors éclairé par un réflecteur placé au-dessous. Lorsque le corps qu'on observe est opaque, on le place sur un très-petit disque de verre noir collé sur une lame de verre transparent, et on l'éclaire en dessus au moyen d'une lentille. Le grossissement du diamètre a été porté jusqu'à 1500, mais alors les images sont faiblement éclairées, et ne sont pas aussi nettes que pour un grossissement de 800 à 1000.

La forme des microscopes est très-variée. Maintenant il existe à Paris plusieurs opticiens qui construisent ces appareils avec une grande perfection. Nous nous contenterons d'indiquer la disposition du microscope universel de M. Ch. Chevalier, d'après la description qu'il en donne lui-même dans son ouvrage intitulé *Des Microscopes et de leur usage.*

1375. Le microscope de M. Ch. Chevalier est représenté en élévation fig. 828. A boîte renfermant le tiroir B ; CC support invariable ; D pièce en cuivre, horizontale, articulée avec la colonne au moyen de la charnière E, et à laquelle est fixée en D la tige carrée F, dont la face postérieure est garnie de haut en bas d'une crémaillère : cette tige est fixée à la colonne CC par le bouton G. H miroir concave ; I miroir plan fixé sur la face opposée ; K bouton qui permet de faire tourner le miroir dans le demi-anneau en cuivre I, qui tourne lui-même dans la boîte M ; N bouton qui fait mouvoir cette boîte sur la cremaillère de la tige F ; O pignon qui sert à faire mouvoir la boîte P ; Q vis de rappel qui sert à donner à la platine Z un mouvement insensible, pour placer l'objet exactement au foyer. R corps de l'instrument, mobile horizontalement sur la pièce *a*, et dans un plan vertical autour de la charnière *c* : l'intérieur de ce tube

est recouvert de velours noir ; S oculaire ; T tube qui s'allonge ou se raccourcit au moyen d'une crémaillère et du pignon U ; V tube fermé à son extrémité et renfermant le prisme réflecteur fixé par le bouton *b* : ce tube est réuni au tube R par un assemblage à baïonnette. X tube portant les objectifs Y ; Z platine sur laquelle on place les objets à observer ; *p* lentille dont le foyer est au centre du porte-objet ; *v* diaphragme ayant des orifices de diamètre variable, afin de régler la quantité de lumière projetée sur l'objet ; le tuyau X porte une douille, non indiquée dans la figure, à laquelle sont fixées des tiges articulées qui se terminent par une lentille destinée à éclairer les objets opaques ; l'extrémité Y du tuyau X peut recevoir un petit miroir concave percé au centre, pour éclairer les objets opaques. Ce microscope peut être rendu vertical, comme l'indique la fig. 828 *bis*, et le tuyau X peut être placé en sens contraire pour observer en dessous d'une plaque de verre les objets qui y sont placés ; cette disposition est nécessaire pour les observations relatives aux expériences chimiques.

M. Amici a aussi disposé son microscope de manière à être employé dans une position verticale ou horizontale (*A. C. et P.*, t. XII).

1376. M. Brunner, habile constructeur d'instruments de précision, a fait au microscope composé d'importantes améliorations que nous devons indiquer. La platine sur laquelle reposent les objets est pourvue d'un mouvement de rotation sur elle-même, et en outre d'un mouvement de translation ; ces deux mouvements s'exécutent à l'aide de vis de rappel. La platine est divisée en degrés, et un vernier fixe permet d'apprécier des minutes ; l'autre mouvement s'effectue à l'aide d'une vis dont le pas est de moins d'un demi-millimètre, mobile par un bouton divisé en 200 parties égales, et pourvu d'un vernier divisé en 10 parties ; ainsi, par le mouvement de transport de la plaque, on peut estimer une très-petite fraction de millimètre. Au moyen de ces mouvements et d'un fil placé au foyer de l'oculaire, on peut facilement mesurer les angles des cristaux microscopiques et la largeur des corps. Le microscope de M. Brunner est vertical ; mais on peut adapter à sa partie supérieure un tuyau incliné qui, à l'aide d'un prisme intérieur, renvoie l'image dans une direction un peu inclinée à l'horizon, très-commode pour l'observateur ; on place à son extrémité une chambre claire à prisme, qui fait voir l'image avec une grande netteté sur un papier horizontal, et dont on peut facilement suivre les contours avec un crayon. La première disposition du micromètre angulaire est due à M. Ras-

pail et à M. Lebaillif; il se composait d'une plaque de verre sur laquelle une ligne fine était tracée au diamant; elle était placée au foyer de l'oculaire; où elle pouvait tourner sur elle-même; on appliquait successivement l'image de la ligne contre les faces du cristal microscopique, et un cercle extérieur permettait de mesurer l'angle décrit par cette ligne.

1377. Pour se servir d'un microscope, après avoir choisi l'oculaire qui convient au grossissement qu'on veut obtenir, on règle l'éclairage, et on amène l'objet au foyer; mais il y a dans l'usage de ces instruments, une quantité de précautions à prendre et de détails que ne comporte pas un traité élémentaire de physique, et pour lesquels nous renvoyons au livre de M. Ch. Chevalier.

1378. On peut, à l'aide du microscope, mesurer les dimensions absolues des corps : on y parvient facilement en plaçant l'objet sur une lame de verre divisée, par des lignes parallèles très-rapprochées, à des distances égales les unes des autres et connues, appareil qu'on désigne sous le nom de *micromètre*, et on observe au microscope combien l'objet couvre de ces divisions. Mais si l'objet a une certaine épaisseur, il est impossible de voir distinctement et l'objet et le micromètre; alors, pour remédier à cet inconvénient, on place un autre micromètre sur un diaphragme qui répond à l'image produite par l'objectif; on observe combien l'image de l'objet occupe de divisions sur ce micromètre intérieur : ce nombre, divisé par le grossissement de l'objectif, donne la grandeur absolue de l'objet.

1379. Le grossissement du microscope peut se calculer, comme nous l'avons déjà dit, en multipliant le grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire. Le grossissement de l'oculaire s'obtient en divisant la distance de la vue distincte par la distance du diaphragme, où se forme l'image. Pour trouver le grossissement de l'objectif, on place sur le porte-objet un micromètre tel que celui dont nous venons de parler, on l'éclaire obliquement, et on observe le nombre de divisions qu'on aperçoit à travers le diaphragme, dont la largeur est connue : le rapport entre cette largeur, estimée en prenant pour unité l'écartement des traits, et le nombre de divisions qu'on aperçoit, donne évidemment le grossissement de l'objectif.

1380. M. Amici a imaginé une méthode beaucoup plus simple et beaucoup plus exacte de mesurer le grossissement des microscopes : elle consiste à placer sur l'oculaire une chambre claire,

à employer pour objet une plaque de verre divisée, par exemple, en centièmes de millimètre, et à projeter l'image sur une feuille de papier portant une échelle divisée en millimètres; il est évident que la largeur d'une des divisions de l'image estimée en millimètres étant multiplié par 100 donnera exactement le grossissement. Quand le microscope est horizontal, le papier qui porte la division et doit être horizontal, et il doit être vertical quand le microscope a cette direction.

1381. *Détermination des indices de réfraction des liquides au moyen du microscope.* Ce moyen ingénieux est dû au docteur Brewster.

Supposons qu'on ait formé avec deux liquides, deux ménisques plans concaves de même courbure : si nous désignons les indices de réfraction des deux liquides par n et n', le rayon de courbure par r, et par f et f' les distances focales principales, nous aurons

$$f = \frac{r}{n-1}, \quad \text{et } f' = \frac{r}{n'-1},$$

équations qui donnent

$$\frac{n'-1}{n-1} = \frac{f}{f'}, \quad \text{et } n' = 1 + (n-1).\frac{f}{f'} \ldots. \ (a).$$

Ainsi, quand on connaîtra l'indice de réfraction d'un des liquides et le rapport des distances focales principales des deux lentilles, on pourra déterminer l'indice de réfraction de l'autre liquide. Pour former des ménisques égaux avec différents liquides, il suffit de les placer entre une lame de verre à faces parallèles et une même lentille. Quant à la détermination des distances focales principales, on y parvient facilement par le procédé suivant.

Imaginons qu'on place successivement les deux liquides entre l'objectif d'un microscope et un verre plan, et qu'on observe successivement les distances d, d', d'', auxquelles un objet doit être placé pour être vu distinctement lorsque l'objectif est nu, et garni du ménisque formé avec l'un et l'autre de ces liquides, l'oculaire restant immobile; désignons par F, F', F'', les distances focales principales de la lentille objective dans ces trois circonstances, et par m la distance constante à laquelle se forme l'image derrière l'objectif, nous aurons

$$\frac{1}{m} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F}, \quad \frac{1}{m} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{F'}, \quad \text{et } \frac{1}{m} + \frac{1}{d''} = \frac{1}{F''}.$$

Mais remarquons que P' (fig. 829) étant le foyer principal de la lentille composée, formée de l'objectif et du ménisque du premier liquide, et P le foyer principal de la lentille, si l'on plaçait au point P' un point lumineux devant le ménisque liquide seul, le point lumineux ferait son foyer conjugué en P : car, si le rayon cb passait dans le verre, il aurait la direction ab : par conséquent, en passant dans l'air, il aura celle que le rayon ab prendrait en

passant du verre dans l'air ; F et F′ sont donc des foyers conjugués par rapport au ménisque liquide. Il en sera de même de F et F″ ; et, comme les distances focales principales des ménisques sont représentées par f et f', on aura

$$\frac{1}{F} - \frac{1}{F'} = \frac{1}{f}, \quad \text{et} \quad \frac{1}{F} - \frac{1}{F''} = \frac{1}{f'}.$$

Ces équations, combinées avec les précédentes, donnent

$$\frac{1}{f} = \frac{d' - d}{dd'}, \quad \frac{1}{f'} = \frac{d'' - d}{dd''},$$

et par conséquent

$$\frac{f}{f'} = \frac{d'' - d}{d' - d} \cdot \frac{d'}{d''};$$

et, en substituant cette valeur dans l'équation (a), il vient

$$n' = 1 + (n - 1) \cdot \frac{d'' - d}{d' - d} \cdot \frac{d'}{d''}.$$

Ainsi, pour obtenir l'indice de réfraction n', il suffira de déterminer par expérience d, d', d''. M. E. Becquerel a fait un grand nombre d'expériences par cette méthode (*C. R.*, t. XI, 1841).

1382. *Lunette astronomique.* La lunette astronomique la plus simple est composée de deux verres, comme le microscope (fig. 825) ; seulement l'objectif a de plus grandes dimensions et peut être facilement achromatisé ; l'oculaire est aussi achromatique. La marche des rayons est représentée dans la fig. 829 A. Les objets se trouvant très-éloignés, l'image $m'n'$ se fait sensiblement au foyer principal de l'objectif. Les angles visuels de l'image et de l'objet sont $m'Bn'$ et $m'An'$; si l'on néglige la distance de l'image $m'n'$ au foyer de l'oculaire, cette image se trouvera au foyer principal des deux verres, et le grossissement de la lunette, qui est proportionnel aux tangentes de la moitié des angles $m'Bn'$ et $m'An'$, sera représenté par le apport des distances focales principales de l'objectif et de l'oculaire.

1383. *Oculaires achromatiques.* Dans les lunettes astronomiques, ainsi que dans toutes les lunettes à objectifs achromatiques, on est obligé d'employer des oculaires aussi achromatiques. On pourrait les construire, comme les objectifs, de plusieurs lentilles superposées ; mais il est beaucoup plus simple de produire l'achromatisme par la combinaison de deux verres de même nature. Cette disposition est analogue à celle qu'on emploie dans les microscopes à objectif simple ; mais l'achromatisme ne provient pas de la même cause :

car l'achromatisme des images ne se produit dans ces derniers instruments qu'autant que l'objectif lui-même n'est pas complétement achromatique (fig. 824 et 825). Dans le cas dont il s'agit, c'est l'aberration de sphéricité des lentilles qui détruit l'aberration de réfrangibilité. Pour en concevoir la raison, considérons un rayon de lumière blanche qui pénètre dans la première lentille : les rayons émergents de différentes teintes sont séparés et d'autant plus inclinés sur l'axe qu'ils sont plus réfrangibles ; mais alors ils rencontrent la seconde lentille en des points d'autant plus voisins de l'axe, et éprouvent une déviation d'autant plus petite qu'ils sont moins inclinés. On conçoit alors, que les courbures des lentilles peuvent être déterminées de manière que les rayons colorés, provenant d'un même rayon, de lumière blanche, émergent sensiblement dans la même direction ; ce qui est la condition de l'achromatisme. L'oculaire achromatique à deux verres de même nature est dû à Campani ; le premier verre était placé en avant du foyer de l'objectif. Mais Ramsden a fait à cet appareil un changement important, qui consiste à placer le premier verre au delà de ce foyer. Il en résulte que, quand on place un micromètre au foyer de l'objectif, il reste fixe ; tandis que, dans la disposition de Campani, il se mouvrait avec l'oculaire, et pourrait éprouver des dérangements par les petits mouvements qu'on est obligé de donner à l'oculaire pour l'accommoder aux différentes vues.

On a trouvé par le calcul et par l'expérience, que dans l'oculaire achromatique de Campani les deux lentilles devaient être planes d'un côté, que les faces planes devaient être tournées toutes les deux vers l'objet, et que leur distance devait être à peu près égale à la demi-somme de leurs longueurs focales. En désignant par f et f' les distances focales des deux lentilles, on a reconnu que la longueur focale d'une seule lentille qui produirait le même grossissement serait $2ff' : f + f'$.

Dans l'oculaire achromatique de Ramsden, les deux lentilles ont également une face plane ; mais les faces courbes sont en regard, elles ont même longueur focale, et sont placées à une distance l'une de l'autre égale aux deux tiers de la longueur focale commune.

1384. On peut mesurer le grossissement des lunettes astronomiques de la manière suivante : on règle la distance des verres de manière à voir nettement les objets éloignés ; alors, en désignant par F la distance focale de l'objectif et par f celle de l'oculaire, la longueur du tuyau est égale à $F + f$; on enlève ensuite l'objectif, on reçoit sur un écran l'image du cercle d'ouverture

du tuyau formé par l'oculaire, et on mesure sa distance à l'oculaire. En désignant cette distance par m, on a évidemment

$$\frac{1}{F+f}+\frac{1}{m}=\frac{1}{f}; \quad \text{d'où} \quad \frac{F+f}{m}=\frac{F}{f}:$$

ainsi le grossissement est égal à la longueur du tuyau divisée par la longueur m.

Le champ de la lunette est la partie de l'espace qu'on peut apercevoir. Il est évidemment terminé par le cône qui a son sommet au centre optique de l'objectif, et pour base le cercle de l'oculaire : ainsi, en désignant par D la distance de ce centre à l'oculaire, par R le rayon du cercle de l'oculaire, R : D sera la tangente de la moitié de l'angle au centre du cône, et pourra servir de mesure au champ de l'instrument.

1385. *Lunettes terrestres.* Les lunettes que nous venons de décrire renversent les objets : cela est sans aucun inconvénient pour les observations astronomiques; mais il n'en est pas de même des lunettes destinées à observer les objets terrestres, il est nécessaire que la dernière image soit droite. Pour cela, on compose l'oculaire de quatre verres (fig. 830); les deux premiers B et C ont pour objet de redresser l'image, et les deux derniers de compléter l'achromatisme : ils sont disposés comme dans l'oculaire de Campani ou de Ramsden. Le grossissement dépend des foyers des cinq verres et de l'intervalle qui les sépare; en laissant les deux derniers oculaires fixes, et en faisant varier la position des autres dans de certaines limites, le grossissement variera. M. Cauchoix a établi ce mouvement dans des lunettes qu'il nomme *polyaldes;* ce grossissement varie de 20 à 40, ou de 80 à 50. Souvent aussi on emploie des lunettes à quatre verres (fig. 831); l'inspection seule de la figure suffit pour faire comprendre les effets produits par les verres.

1386. Pour trouver le grossissement de l'oculaire à trois verres, désignons par f la distance focale de l'objectif, et par f', f'', f''', les distances focales des trois verres qui forment l'oculaire, à partir de celui qui est le plus éloigné de l'œil : il est évident que, si les distances focales f' et f'' sont égales, l'image $P''Q''$ sera égale à l'image $Q'P'$, et, par conséquent, les deux premières lentilles seront sans influence sur le grossissement qui résultera uniquement des distances focales de l'objectif et du dernier oculaire, et qui sera représenté par $f : f'''$. Dans le cas où les longueurs focales f' et f'' diffèrent, le rapport des diamètres apparents des deux images $P''Q''$ et $Q'P'$ sera $f'' : f'$ et, par conséquent, le grossissement final sera $ff'' : f'f'''$. Dans la lunette à cinq verres le grossissement sera représenté par la même formule, en désignant par f^{IV} la

distance focale d'une lentille qui produirait le même grossissement que les deux dernières.

1387. Dans les lunettes terrestres, comme dans les lunettes astronomiques, il faut employer des objectifs d'un diamètre d'autant plus grand que l'on veut obtenir un grossissement plus considérable, ou plus de netteté, car l'image n'est éclairée que par la lumière reçue par l'objectif.

Lorsque les objectifs dépassent 6 à 8 centimètres de diamètre, il est très-difficile de se procurer des plaques de flint-glass suffisamment homogènes; les bonnes lunettes achromatiques d'une grande ouverture sont rares, et d'un prix élevé.

Quelle que soit d'ailleurs cette ouverture, la détermination des courbures des lentilles les plus favorables pour détruire, ou du moins pour rendre aussi petites que possible les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité, est un problème compliqué que les constructeurs résolvent par tâtonnement.

1388. Comme il est très-difficile de se procurer des lentilles de flint-glass bien homogène, lorsque le diamètre excède 12 ou 15 centimètres, M. Barlow a essayé d'achromatiser un objectif simple formé de verre ordinaire au moyen d'une lentille creuse plane-convexe, renfermant du sulfure de carbone, substance très-dispersive, placée à une certaine distance. M. Barlow a complétement réussi.

La lunette construite par ce physicien était formée d'un objectif de verre plan-convexe de $0^m,198$ d'ouverture et d'une longueur focale de $1^m,98$: à la distance de $1^m,016$ se trouvait une lentille divergente de sulfure de carbone; alors le foyer était porté en avant de cette lentille à $3^m,657$ de l'objectif; le grossissement pouvait s'élever jusqu'à 700.

1389. *Lunette de Galilée.* Cette lunette (fig. 832) n'est composée que de deux verres. L'oculaire est une lentille divergente, placée en avant du lieu de l'image $m'n'$ formée par l'objectif. Les rayons élémentaires qui composent chaque faisceau émané des différents points de l'objet deviennent sensiblement parallèles au delà de l'oculaire; mais ces faisceaux se croisent, et leurs prolongements représentent l'image droite $n''m''$. Dans ces lunettes, la position de l'œil la plus favorable est très-près de l'oculaire, car, à mesure qu'il s'éloigne, il perd une partie des rayons. Cette disposition est employée pour les lunettes de spectacle, parce qu'elle permet de ne leur donner qu'une très-petite longueur; rarement on y emploie des objectifs achromatiques, parce qu'étant destinées à servir

le soir, les couleurs qui s'y développent n'y sont pas très-vives, d'autant plus que leur grossissement n'est jamais fort considérable.

Quant à la mesure du grossissement, remarquons que l'angle PAS $= m'An'$ est celui sous lequel l'objet serait vu directement, et que l'image est aperçue sous l'angle $n''om'' = m'on'$. Or on a

$$\text{tang}\frac{1}{2}m'on' : \text{tang}\frac{1}{2}m'An' :: \text{AB} : o\text{B} :$$

c'est-à-dire à peu près comme les distances focales de l'objectif et de l'oculaire.

Pour trouver la distance x des deux lentilles, désignons par F la distance focale de l'objectif, et par f celle de l'oculaire, par D la distance de la vision distincte, et remarquons que, pour une lentille divergente qui reçoit un faisceau convergent, l'équation des foyers conjugués est

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}.$$

Ainsi on aura

$$\frac{1}{\text{F} - x} + \frac{1}{\text{D}} = \frac{1}{f}; \quad \text{d'où } x = \text{F} - \frac{f\text{D}}{\text{D} - f}.$$

Dans la lunette de Galilée, l'objectif étant convergent, tandis que l'oculaire est divergent, les effets dispersifs de ces deux verres sont opposés. On conçoit alors que, les lentilles étant construites avec des matières différentes, on pourrait déterminer les distances focales de manière à détruire l'aberration de réfrangibilité; mais, pour les mêmes substances, on serait borné à un grossissement qui ne pourrait pas être dépassé. C'est l'oculaire qui devrait être formé de la substance la plus dispersive. En employant du flint-glass pour l'oculaire et du verre ordinaire pour l'objectif, le grossissement compatible avec l'achromatisme est 1,25; mais, en achromatisant partiellement l'objectif, on produit évidemment le même effet que si l'on employait pour l'oculaire une substance plus dispersive; et, par conséquent, on peut obtenir un plus fort grossissement.

1390. La condition nécessaire pour que la vision soit distincte dans tous les instruments que nous venons de décrire, se réduit à ce que les rayons sortent de la lunette avec le degré de divergence convenable pour l'œil de l'observateur. On parvient à remplir cette condition en fixant les différents verres de l'instrument dans des tuyaux mobiles, qui permettent de placer l'objectif et les oculaires aux distances qui conviennent à chaque individu. Il est nécessaire aussi de noircir l'intérieur des tuyaux, afin d'éviter les réflexions qui troubleraient la netteté des images.

1391. *Télescope d'Herschel.* Cet appareil (fig. 833) est formé d'un tuyau au fond duquel se trouve un miroir métallique sphérique concave; les rayons émanés des objets extérieurs forment en avant du miroir une image *m'n'*, que l'on regarde avec une loupe ou avec un oculaire achromatique. Dans cette disposition, l'observateur intercepterait une partie des rayons incidents; mais quand l'axe du miroir est un peu incliné sur l'axe du tuyau, l'image est déviée, et peut être portée hors du tuyau, où l'on peut l'observer sans intercepter aucune partie des rayons incidents. C'est avec un apparail semblable, qui avait 13 mètres de long, qu'Herschel a fait une partie de ses découvertes.

Il est facile de voir que dans cet instrument, le grossissement est égal au rapport de la distance focale principale du miroir à celle de l'oculaire : car, si les rayons n'étaient pas déviés de leur direction (fig. 834), circonstance qui ne changerait pas le grossissement, en désignant par *o* le centre du miroir, par *o'* celui de l'oculaire, et par *mn* l'image formée au foyer du miroir, il est évident que l'objet vu à l'œil nu et à travers l'oculaire sera aperçu sous les angles *mon* et *mo'n*; et les tangentes des moitiés de ces angles sont dans le rapport des distances *po'* et *po*, qui sont sensiblement les distances focales principales de l'oculaire et du miroir.

1392. *Télescope de Newton.* Cet instrument est encore composé d'un tuyau terminé par un miroir (fig. 835); mais il renferme un petit miroir plan incliné à 45°, qui rejette l'image *m'n'* perpendiculairement à sa direction, de sorte qu'on peut l'observer avec un oculaire situé parallèlement au tuyau. Cette disposition évite l'interposition de l'observateur dans les rayons incidents, ou l'inclinaison de l'axe du miroir; mais elle occasionne une perte de lumière considérable, par la réflexion sur le miroir plan. Newton lui avait substitué un prisme de verre rectangulaire (fig. 836); un des côtés de l'angle droit étant disposé perpendiculairement à la direction des rayons incidents, la réflexion sur la face inclinée a lieu sans absorption sensible. Cet instrument est très-incommode pour les recherches astronomiques, à cause de la position de l'observateur. Les appareils suivants n'ont point cet inconvénient.

Dans le télescope de Newton, le grossissement est évidemment le même que si les rayons n'étaient pas réfléchis par le miroir plan, et que l'on pût observer directement l'image *m'n'* avec l'oculaire : le grossissement alors est, comme dans celui d'Herschel, le rapport entre la distance focale du miroir et celle de l'oculaire.

1395. ***Télescope de Grégori*** **(fig. 837). Le miroir plan du télescope de Newton est remplacé par un petit miroir concave, et le grand miroir est percé à son centre d'une ouverture qui reçoit l'oculaire. Les rayons réfléchis sur le grand miroir forment une image** $m'n'$**; cette dernière, réfléchie dans le petit miroir, forme une autre image** $m''n''$ **que l'on regarde directement avec l'oculaire.**

Quant au grossissement, il dépend à la fois des distances focales F et F′ des deux miroirs, de leur distance D, et de la distance focale f du système des oculaires. Pour obtenir la valeur du grossissement en fonction de ces différents éléments, remarquons que, si l'oculaire était placé derrière l'image $m'n'$, le grossissement serait, comme dans les télescopes d'Herschel et de Newton, $F : f$; et, si l'oculaire était placé ensuite derrière l'image $m''n''$, le grossissement varierait dans le rapport de $m''n''$ à $m'n'$: ainsi il sera $Fm''n'' : fm'n'$. Or, le rapport entre $m''n''$ et $m'n'$ est évidemment le même que celui des distances des foyers conjugués du petit miroir à son centre; mais la distance de l'image $m'n'$ au miroir est égale à $D - F$, et, par conséquent, sa distance au centre est égale à $2F' - (D - F) = F + 2F' - D$. Quant à la distance de l'image $m''n''$ au centre du miroir, elle est évidemment égale à $p' - 2F'$, en désignant par p' la distance de cette image au miroir; et on a pour déterminer p' la relation

$$\frac{1}{D-F} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{F'}; \quad \text{d'où} \quad p' = \frac{(D-F)F'}{D-F-F'}:$$

alors on trouve pour $p' - 2F'$,

$$\frac{F'(2F' + F - D)}{D - F - F'},$$

et pour le grossissement,

$$\frac{FF'}{f} \times \frac{1}{D - F - F'}.$$

Il est, par conséquent, variable avec la distance D des miroirs, qui, pour une même distance des objets, change avec la distance de la vision distincte.

1394. ***Télescope de Cassegrain.*** **Cet instrument ne diffère du précédent que par la forme du petit miroir, qui est convexe (fig. 838). Cette disposition a l'avantage de détruire les aberrations de sphéricité des deux miroirs, parce qu'elles sont en sens contraire. Il est évident que pour que l'image** $m''n''$ **se forme, il faut que le petit miroir soit en avant du lieu où se formerait la première image : car les rayons reçus par le miroir convexe, étant convergents, sont réfléchis sous une plus faible convergence et vont alors former l'image** $m''n''$.

Le télescope de Cassegrain est plus court que celui de Grégori de plus de deux fois la longueur focale du petit miroir; il donne plus de lumière, et a moins d'aberrations de sphéricité.

Dans tous les télescopes, les miroirs métalliques doivent avoir le poli le plus parfait.

Les télescopes ont l'avantage de ne point colorer les images lorsque les oculaires sont achromatiques; mais ils absorbent beaucoup de lumière, et pour avoir de forts grossissements il faut employer de très-grands miroirs et des instruments d'une grande longueur. Pour les observations astronomiques, on préfère des lunettes achromatiques; celles de 27 centimètres d'ouverture produisent plus d'effet que les plus grands télescopes connus.

On construit maintenant peu de télescopes, parce qu'on est parvenu à faire des objectifs achromatiques d'une grande perfection et d'un grand diamètre, et que les lunettes dioptriques sont plus avantageuses. La difficulté que présentait la construction des grands objectifs achromatiques ne résidait pas seulement dans le travail des lentilles et dans les courbures nécessaires pour obtenir l'achromatisme; mais dans la difficulté de se procurer des matières bien pures, bien homogènes et exemptes de stries, surtout pour le flint-glas : cette difficulté a été vaincue.

§ 4. *Coloration de la lumière en passant à travers les lames minces.*

1395. Lorsque la lumière traverse des lames d'une grande ténuité, les rayons réfléchis et émergents prennent des teintes variées, analogues à celles que présente le spectre solaire. Ainsi, les bulles de savon, le verre soufflé, tous les liquides volatils répandus en lames minces sur des corps polis d'une teinte foncée, l'huile d'olive déposée sur un liquide noir, présentent les couleurs les plus brillantes. Avec un peu de soin, on peut facilement détacher d'une lame de mica incolore, des feuilles très-minces qui prennent des teintes vives de rouge ou de vert. L'air jouit aussi de la même propriété, lorsqu'il est renfermé en lames très-minces entre deux plaques transparentes, par exemple entre deux plaques de verre que l'on presse fortement l'une contre l'autre. Nous allons décrire, d'après Newton, ces phénomènes et leurs lois, et ce ne sera que plus tard que nous exposerons les différentes hypothèses émises pour les expliquer.

1396. Si, après avoir placé une lentille biconvexe AB (fig. 840), ayant une très-grande distance focale, sur un plan CD, on fait arriver sur la lentille un rayon de lumière blanche, l'œil étant placé de manière à recevoir la lumière réfléchie, on apercevra au point de contact une *tache noire*, et autour une série d'anneaux colorés, dans lesquels les teintes se succèdent dans l'ordre suivant (nous rapportons les propres expressions de Newton):

« Après la tache noire centrale, formée au contact des verres, venaient le bleu, le blanc et le rouge : le bleu était en très-petite quantité, le jaune et le rouge étaient assez abondants et occupaient ensemble à peu près autant de place que le blanc, et quatre ou cinq fois plus que le bleu. Immédiatement après cette première série, il en venait une autre où l'on distinguait le violet, le bleu, le vert, le jaune et le rouge : toutes ces couleurs étaient abondantes et vives, excepté le vert, qui était en fort petite quantité, et qui paraissait beaucoup plus pâle et plus faible que le reste; le violet occupait moins de place qu'aucune des quatre autres couleurs, et le bleu moins que le jaune ou le rouge. La troisième série de couleurs était le pourpre, le bleu, le vert, le jaune et le rouge : ici le pourpre semblait plus rougeâtre que le violet de la série précédente, et le vert était beaucoup plus visible, étant aussi vif et en aussi grande quantité qu'aucune des autres couleurs, excepté le jaune; mais le rouge commençait à se ternir un peu, tirant extrêmement sur le pourpre. Ensuite venait la quatrième série, composée de vert et de rouge : le vert était fort abondant et très-vif, tirant d'un côté sur le bleu, et de l'autre sur le jaune; mais dans cette quatrième série, il n'y avait ni violet, ni bleu, ni jaune; et le rouge était fort imparfait. Les couleurs qui succédaient à celles-ci étaient de plus en plus faibles et indécises, jusqu'à ce qu'après trois ou quatre révolutions, elles dégénéraient insensiblement en blanc. La distribution des couleurs était alors, à partir du centre : noir, bleu, blanc, jaune, rouge; violet, bleu, vert, jaune, rouge; pourpre, bleu, vert, jaune, rouge; vert, rouge; bleu-verdâtre, rouge; bleu-verdâtre, rouge-pâle; bleu-verdâtre, blanc-rougeâtre. »

Pour bien observer ces successions de teintes, il faut employer, comme nous l'avons déjà dit, une lentille ayant une très-grande distance focale; la lentille dont Newton s'est servi avait 51 pieds anglais de foyer. Pour produire la tache noire centrale, il faut un peu frotter la lentille contre le verre afin d'établir le contact. En

soulevant la lentille; chaque anneau se rapproche du centre en s'étalant, s'y réfugie et disparaît. Ce phénomène donne un moyen très-simple de bien observer les teintes dont se compose chaque anneau. On peut aussi agrandir les anneaux en les observant au moyen d'une loupe.

Lorsque les rayons incidents s'inclinent sur la surface de la lentille, les anneaux s'élargissent perpendiculairement au plan d'incidence, et prennent une forme elliptique.

1397. En plaçant l'œil de manière à recevoir les rayons transmis à travers la lentille et la plaque, on observe un cercle blanc au point de contact, et une suite de cercles irisés dans lesquels les teintes se succèdent de telle manière, que les anneaux vus par réflexion et par réfraction qui occupent le même lieu ont des couleurs complémentaires; mais les anneaux par transmission sont beaucoup plus faibles que les anneaux réfléchis.

1398. Si l'on place un liquide quelconque entre la lentille et le verre, les mêmes phénomènes ont encore lieu, les couleurs des anneaux sont les mêmes et se succèdent toujours dans le même ordre; on ne trouve de différence que dans le diamètre des anneaux et l'étendue absolue qu'occupent les couleurs de chacun d'eux. En opérant dans le vide, les anneaux ont les mêmes dimensions et les mêmes teintes que dans l'air. Enfin, une lame mince transparente, dont l'épaisseur va en croissant produit des franges irisées, dans lesquelles les teintes se succèdent dans le même ordre : c'est ce qu'on peut vérifier en répandant une huile volatile sur un liquide noir, et dans les bulles de savon.

1399. *Anneaux colorés formés dans une lame d'air, sous l'incidence perpendiculaire, par une lumière homogène.* Revenons maintenant aux anneaux formés entre deux plaques de verre. Ces anneaux se forment réellement dans l'espace qui sépare les deux verres, car ils ne changent ni avec la nature, ni avec l'épaisseur des plaques; mais ils se déplacent avec le point de contact des plaques, et sont d'autant plus étalés que la distance des deux plaques varie plus lentement autour du point de contact.

Newton, pour analyser ces phénomènes, répéta les expériences en employant de la lumière homogène : il reconnut alors qu'il se formait par réflexion et par transmission une série d'anneaux alternativement noirs et de la couleur du rayon, qui se serraient d'autant plus qu'ils s'éloignaient davantage du point de contact de la lentille, et que le lieu des anneaux colorés par réflexion était celui des an-

neaux obscurs par réfraction. Les mêmes apparences se manifestaient quelle que fût la teinte du rayon; mais les diamètres des anneaux de même ordre variaient avec la teinte du rayon. Il résulte évidemment de là, que les anneaux diversement colorés qu'on aperçoit dans la lumière blanche, résultent de la superposition partielle des anneaux produits par les rayons de différentes teintes qui existent dans la lumière blanche.

1400. Newton procéda alors à la mesure des diamètres des anneaux colorés réfléchis sous une incidence presque perpendiculaire, par des rayons homogènes, en plaçant l'œil très-près de l'axe de la lentille, à une grande hauteur, et en prenant sur la lentille à l'aide d'un compas, le diamètre de chaque anneau dans sa partie la plus brillante et dans des points également distants de l'œil. Il trouva ainsi, que les carrés des diamètres des anneaux successifs d'une même teinte étaient entre eux comme les carrés des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc.; et que les carrés des diamètres des anneaux transmis étaient entre eux comme la série des nombres pairs 0, 2, 4, 6, 8, etc. Mais les diamètres des anneaux ne sont pas les mêmes que si la lame mince était isolée : la lentille supérieure les agrandit. Il fallait alors déterminer les diamètres des anneaux dans la lame d'air, en prolongeant par réfraction à travers la lentille, les rayons émergents correspondant aux extrémités des diamètres des anneaux : les points de rencontre des rayons réfractés avec la seconde surface du verre supérieur sont évidemment les extrémités des diamètres des anneaux dans la lame mince. Newton, en faisant ce calcul, reconnut que les diamètres des anneaux dans la lame mince suivaient exactement les mêmes lois que ceux des anneaux observés.

Soient ZCC' (fig. 841) l'axe de la lentille, XY sa surface supérieure, et X'Y' sa surface inférieure : ces surfaces appartenant à des sphères d'un rayon très-grand par rapport aux diamètres des anneaux, on peut les considérer comme étant planes. Alors, si nous désignons par h la hauteur CZ de l'œil, par θ l'angle d'incidence, par θ' l'angle de réfraction, par n l'indice de réfraction, par e l'épaisseur du verre, et par y et y' les demi-diamètres MC et M'C', on aura, à cause de la petitesse des angles θ et θ'.

$$\theta = \frac{y}{h}, \quad \theta' = \frac{\theta}{n}, \quad \text{par conséquent } M'N' = e\theta' = \frac{ey}{nh},$$

et

$$y' = y\left(1 + \frac{e}{nh}\right).$$

On voit, d'après cela, que les rapports des diamètres vrais sont les mêmes que ceux des diamètres apparents.

La détermination directe des diamètres des anneaux colorés dans la lame d'air pourrait se faire directement d'une manière bien simple : si l'on trace sur la plaque de verre inférieure et sur la face en contact avec la lentille, au moyen d'une pointe de diamant, des lignes très-fines et également espacées, on verra à la fois ces divisions et les anneaux, et la distance de la division qui coïncide avec un anneau à celle qui se trouve au point de contact sera évidemment le demi-diamètre de l'anneau dans la lame d'air (M. Babinet).

1401. Il fallait alors déterminer les épaisseurs de la lame d'air correspondant aux anneaux. Or, il est facile de démontrer que la distance d'un point quelconque de la surface inférieure de la lentille à la lame CD est proportionnelle au carré de sa distance au point de contact : par consequent, les épaisseurs de la lame d'air qui correspondent aux milieux des largeurs des anneaux sont :

Pour les anneaux réfléchis, comme 1 : 3 : 5 : 7 : 9, etc.

Pour les anneaux transmis, comme 0 : 2 : 4 : 6 : 8, etc.

En effet, soient AB (fig. 842) la sphère inférieure de la lentille, PQ le plan sur lequel elle est posée, MM′ le diamètre d'un anneau, MD l'épaisseur de la lame d'air correspondante, on a

$$MB^2 = BC \times AB\,; \quad \text{d'où } e = \frac{y^2}{2r},$$

e étant l'épaisseur MD ou BC de la lame d'air, y le rayon de l'anneau MC ou MB, car cette dernière quantité diffère très-peu de la première, et r le rayon du cercle.

Si, au lieu d'un plan et d'une lentille biconvexe, on employait une lentille biconvexe et une lentille concave, on obtiendrait encore le même résultat. En effet, soient MBM′ et DBD′ (fig. 843) les deux surfaces sphériques renfermant la lame d'air, r et r' leurs rayons, on a évidemment, d'après ce qui précède,

$$ME = \frac{y^2}{2r}, \quad DE = \frac{y^2}{2r'}, \quad \text{et } e = ME - DE = y^2\left(\frac{1}{2r} - \frac{1}{2r'}\right).$$

Il résulte évidemment de ces deux lois que, si la lame d'air était renfermée entre une surface plane et une surface conique (fig. 844), les milieux des largeurs des anneaux réfléchis et réfractés seraient à des distances égales.

Newton ayant reconnu ensuite que les différences d'épaisseur des lames d'air correspondant aux périmètres intérieurs et extérieurs des anneaux brillants et obscurs étaient constantes, il en résulte que, dans le cas de la fig. 844, tous les anneaux réfléchis ou transmis

ont la même largeur, et que la distance du point A à la circonférence intérieure du premier anneau réfléchi est égale à la moitié de la largeur d'un anneau : car les distances du point A aux milieux des anneaux successifs réfléchis et transmis sont représentées par les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc., et la différence constante 1 est égale à deux demi-largeurs d'anneau, et par suite $Aa = 1 - 1/2 = 1/2$. Ainsi, en désignant par e l'épaisseur d'air correspondant à la circonférence intérieure du premier anneau réfléchi, les épaisseurs d'air aux périmètres intérieurs et extérieurs des anneaux successifs seront e, $3e$, $5e$, $7e$, $9e$, etc., et les épaisseurs d'air correspondant aux milieux des anneaux seront, pour les anneaux réfléchis, $2e$, $6e$, $10e$, $14e$, etc., et pour les anneaux transmis 0, $4e$, $8e$, $12e$, $16e$, etc.

Ces rapports restent les mêmes, quelles que soient la teinte du rayon simple, la nature du corps dont la lentille et la plaque sont formées, ainsi que celle de la substance qui forme la lame mince. Mais, pour chaque couleur et chaque lame mince, l'épaisseur absolue de la lame mince correspondante à un anneau de même rang est variable ; cette épaisseur augmente du violet au rouge.

1402. Newton a reconnu, par des expériences nombreuses, que les diamètres des anneaux de même rang, formés avec les différents rayons correspondant aux limites des sept couleurs qu'il avait distinguées dans le spectre, étaient entre eux comme les racines cubiques des nombres

$$1, \frac{9}{8}, \frac{5}{6}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{9}{16}, \frac{1}{2};$$

alors les épaisseurs des lames d'air correspondantes, étant proportionnelles aux carrés des diamètres, sont entre elles comme les carrés de ces racines cubiques.

Le tableau suivant donne le résultat de ces calculs :

Désignation des couleurs.	Épaisseur de la lame d'air au périmètre intérieur du premier anneau.
Rouge extrême	e
Limite du rouge et de l'orangé	$e.0,9248$
Limite de l'orangé et du jaune	$e.0,8855$
Limite du jaune et du vert	$e.0,8255$
Limite du vert et du bleu	$e.0,7635$
Limite du bleu et de l'indigo	$e.0,7114$
Limite de l'indigo et du violet	$e.0,6814$
Violet extrême	$e.0,6300$

Pour l'air, la valeur de e estimée en millionièmes de pouces anglais est 3,172206; et, comme le pouce anglais vaut $25^{mm},39954$, cette valeur de e en millimètres est $0^{mm},00008057$.

A l'aide de ces résultats et de la loi que suivent les diamètres des anneaux des différents ordres, on peut facilement trouver les épaisseurs des lames d'air qui correspondent aux diamètres intérieurs et extérieurs des anneaux de tous les ordres et de toutes les teintes.

1403. *Anneaux formés dans une lame d'air, sous une incidence quelconque, par une lumière homogène.* Dans les expériences que nous venons de rapporter, Newton observait les anneaux le plus perpendiculairement possible. Si l'on abaisse l'œil en s'écartant peu à peu de cette position, on voit les anneaux s'agrandir en se dilatant circulairement de tous côtés; mais dans chaque position de l'œil les lois sont les mêmes. Newton a trouvé, par l'observation, la loi suivant laquelle les épaisseurs de la lame d'air variaient en raison de l'angle sous lequel la réflexion avait lieu.

Par la comparaison d'un très-grand nombre d'observations, Newton a reconnu, qu'en désignant par e et e' les épaisseurs d'une substance qui réfléchissent le même anneau, sous l'incidence perpendiculaire et sous l'incidence r, jusqu'à $r = 60°$, l'épaisseur e' était assez bien représentée par la formule

$$e' = \frac{e}{\cos r};$$

mais la formule la plus exacte, celle qui donne des valeurs de e' qui s'accordent avec l'expérience pour toutes les inclinaisons, est

$$e' = \frac{e}{\cos u}, \text{ dans laquelle on a, pour déterminer } u, \ \sin u = \frac{105+n}{106} \sin r;$$

n étant l'indice de la substance de la lame mince par rapport au milieu superposé. Dans le cas des anneaux formés par une lame d'air renfermée entre deux lames de verre, n est l'indice renversé de la lame de verre.

1404. *Anneaux formés sous une incidence quelconque par une lumière homogène dans une lame mince d'un corps quelconque.* Toutes les expériences que nous venons de rapporter sont relatives à une lame d'air. Pour tous les autres gaz, et en général pour tous les corps transparents, les phénomènes sont encore les mêmes, et ils suivent exactement les mêmes lois; seulement, les valeurs absolues des diamètres des anneaux de même couleur et de même ordre sont d'autant plus petites que la substance a une plus grande puissance réfractive. Ces variations se font suivant une loi très-

simple qui peut s'énoncer ainsi : *Dans deux lames de différente nature, les épaisseurs qui réfléchissent ou transmettent un anneau de même ordre, sous la même incidence, sont entre elles dans le rapport inverse des indices de réfraction.*

Soient n l'indice de réfraction de la lame mince pour des rayons qui pénètrent dans la lame en sortant du vide, n' l'indice pour le vide et l'air, e' et e les épaisseurs de la lame de la substance et de la lame d'air qui, vues l'une et l'autre sous la même incidence, réfléchissent la même teinte, on a, d'après Newton,

$$e' = \frac{n}{n'} e.$$

On peut vérifier cette loi par une expérience facile à répéter : on prend deux lames de verre à peu près planes et bien sèches ; on les applique l'une sur l'autre ; il se produit des anneaux très-larges et très-distincts ; on laisse tomber une goutte d'eau sur le bord des plaques, elle s'introduit entre elles par la capillarité ; mais tout l'air ne sera pas chassé, et l'on aura des anneaux formés dans l'air et dans l'eau partant d'un centre commun : alors on regarde les anneaux le plus perpendiculairement possible, et l'on trouve que le 4e anneau dans l'air coïncide avec le 5e dans l'eau. Or, si l'on désigne par e et e' les épaisseurs de la lame d'air et de la lame d'eau dans le 1er anneau, les épaisseurs dans les anneaux suivants seront

Pour l'air, e, $3e$, $5e$, $7e$, $9e$....
Pour l'eau, e', $3e'$, $5e'$, $7e'$, $9e'$....

Ainsi l'épaisseur de la lame d'air à l'endroit du 4e anneau sera $7e$, et celle de la lame d'eau sera $9e'$; et, puisque ces deux épaisseurs sont égales, nous aurons

$$9e' = 7e; \quad \text{d'où } \frac{e'}{e} = \frac{7}{9},$$

rapport peu différent de celui des indices de réfraction de l'air et de l'eau.

On peut former des anneaux colorés avec les différents gaz en faisant le vide entre la lentille et la plaque, et en y introduisant le gaz sur lequel on veut opérer. Pour observer les anneaux colorés qui se forment dans les liquides, il suffit d'introduire une goutte du liquide entre la lentille et la plaque : par la capillarité elle pénètre bientôt tout autour du point de contact. On peut aussi observer les anneaux colorés sur des bulles de savon. Pour cela, il faut les renfermer sous des cloches, afin d'éviter l'évaporation, qui les fait crever promptement ; mais il est plus simple de les déposer sur la surface du liquide même qui a servi à les former : on obtient un hémisphère dont l'épaisseur va en croissant depuis le sommet jusqu'à la circonférence qui s'appuie sur le liquide.

La loi que suivent les anneaux colorés formés dans différentes substances diaphanes explique plusieurs phénomènes en apparence assez singuliers.

1405. Lorsqu'on observe les anneaux colorés formés dans une lame d'air, les diamètres des anneaux restent les mêmes lorsque l'on raréfie l'air, même lorsque l'appareil est placé dans le vide le plus parfait que nous puissions produire : la raison en est que, l'indice de réfraction de l'air étant très-voisin de l'unité, les variations qu'il éprouve par la dilatation ne peuvent pas altérer les diamètres des anneaux d'une manière sensible.

1406. Quand on introduit de l'eau entre la lentille et la lame, les anneaux deviennent beaucoup plus petits, et ne changent pas de diamètre par l'inclinaison de l'œil, tandis que les anneaux produits dans l'air éprouvent au contraire de très-grandes variations dans les mêmes circonstances. Cette différence provient de ce que le rayon qui traverse la lame d'eau, étant fortement réfracté, s'écarte peu de sa direction par l'inclinaison du rayon incident, tandis que le rayon qui passe dans l'air s'écarte beaucoup de sa direction à mesure qu'il devient plus oblique : or, comme c'est l'épaisseur de la lame traversée par le rayon qui détermine la position des anneaux, on voit qu'ils doivent peu varier dans l'eau par inclinaison, et qu'il n'en est pas ainsi pour l'air.

1407. *Anneaux formés par la lumière blanche.* Jusqu'ici nous avons toujours supposé que les lames minces étaient éclairées par des rayons homogènes; supposons maintenant qu'ils le soient par des rayons de lumière blanche. La lumière blanche étant composée de rayons de toutes les couleurs, chacun d'eux formera la série d'anneaux qu'il aurait produit s'il eût éclairé isolément la lame mince : il se formera donc une infinité de systèmes d'anneaux de différentes couleurs. Mais les anneaux de même ordre appartenant aux différentes couleurs, n'ayant pas le même diamètre, anticiperont les uns sur les autres, et formeront des anneaux dont les teintes seront variables selon la couleur des anneaux superposés; et, à une certaine distance, ils ne produiront plus qu'une teinte uniforme de lumière blanche.

Pour concevoir l'anéantissement des anneaux colorés à une certaine distance du centre, il faut revenir à ce qui se passe quand la lumière est homogène. En faisant arriver un faisceau de rayons rouges sur une lame d'air renfermée entre une lentille et une lame plane, on voit les anneaux se resserrer d'autant plus qu'ils s'éloi-

gnent davantage du centre, et disparaître à une certaine distance; et comme ils s'évanouissent de même quand la lame d'air est renfermée entre deux surfaces planes, la disparition ne tient pas au rapprochement des anneaux. Elle provient uniquement de ce que les rayons de lumière que nous considérons comme homogènes ne le sont pas, puisque la réfrangibilité des rayons varie d'une manière continue d'une des extrémités du spectre à l'autre : par conquent, quelque petit que soit le faisceau coloré pris dans le faisceau qui a traversé un prisme, il est réellement composé d'un grand nombre de rayons ayant des indices de réfractions différents. Alors, chacun d'eux donnera des anneaux qui coïncideront d'abord sensiblement, mais qui s'écarteront les uns des autres à mesure qu'ils s'éloigneront du centre; les teintes s'affaibliront d'abord, et à une certaine distance les parties lucides des uns coïncideront avec les parties obscures des autres, et les anneaux disparaîtront. On voit facilement d'après cela la cause de la disparition des anneaux irisés dans la lumière blanche. L'exactitude de cette explication est confirmée par une expérience facile à répéter : si l'on regarde les anneaux à travers un prisme, la dispersion les sépare, et l'on en aperçoit un nombre beaucoup plus grand qu'à l'œil nu.

1408. Newton a donné une construction géométrique pour trouver immédiatement la teinte des anneaux réfléchis ou réfractés sous une épaisseur donnée; comme elle est très-simple, nous la décrirons avec détail. Rappelons-nous d'abord que les épaisseurs d'air ou de tout autre corps diaphane qui correspondent aux limites des anneaux d'une même couleur forment la progression arithmétique

$$e,\ 3e,\ 5e,\ 7e....$$

Ainsi, en divisant une ligne indéfinie ZZ' en parties égales à e (fig. 845), depuis l'épaisseur zéro jusqu'à Z1, les rayons seront transmis; depuis l'épaisseur Z1 jusqu'à l'épaisseur Z3 les rayons seront réfléchis; de Z3 à Z5 ils seront transmis, et ainsi de suite. Mais le maximum de réflexion aura lieu aux épaisseurs Z2, Z6, Z10, qui suivent la progression arithmétique des nombres impairs; et le maximum de transmission aura lieu pour les épaisseurs Z4, Z8, Z12, etc., qui suivent la progression arithmétique des nombres pairs. Ainsi, pour connaître si une épaisseur donnée réfléchit ou transmet cette couleur, on portera cette épaisseur sur la ligne ZZ' de Z en X, et la position du point X fera connaître l'effet qui sera produit; mais il faut remarquer que la transmission est totale dans les épais-

seurs qui lui sont assignées, au lieu que la réflexion se dégrade à partir de la ligne moyenne.

Pour rendre cette construction générale, prenons sur la ligne UAH (fig. 846) des distances UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, proportionnelles aux nombres 0,6300, 0,6813, 0,7114, 0,7635, 0,8255, 0,8855, 0,9248, 1, qui représentent les différentes valeurs de *e* pour les sept principales couleurs du spectre; par les points A, B, C, D, E, F, G, H, élevons des perpendiculaires indéfinies sur AH; divisons la ligne A*a* en parties égales entre elles et à la valeur de *e* pour les rayons violets extrêmes, et joignons ces points avec le point U, par des droites que nous prolongerons jusqu'à la ligne H*h*. Il est évident, d'après cette construction, que toutes les droites A*a*, B*b*, C*c*, etc., seront divisées en parties égales entre elles et à la valeur de *e* correspondante : par conséquent, la figure représente, pour toutes les couleurs du spectre, une construction analogue à celle de la fig. 845.

Cette construction peut évidemment s'appliquer à des lames minces de toute espèce, puisque les anneaux suivent toujours les mêmes lois; il faudrait seulement changer les valeurs absolues des épaisseurs auxquelles ils se forment.

Il est facile, d'après cette reconstruction, de trouver les teintes composées, réfléchies ou réfractées, à diverses épaisseurs.

« Si l'on conçoit (Newton, *Optique*) que les rayons hétérogènes sont tour à tour réfléchis dans les espaces 1IL3, 5MO7, etc. et transmis dans les espaces AHI1, 3LM5, 7OP9, etc., il sera facile de savoir quelle couleur doit paraître en plein air, à telle ou telle épaisseur d'un corps mince transparent : car, en appliquant une règle parallèle AH, à la distance de AH qui représente l'épaisseur du corps transparent, les espaces alternes 1IL3, 5MO7, etc., croisés par la règle, désigneront les couleurs primitives réfléchies dont est composée celle qui paraît en plein air à telle ou telle épaisseur. Pour savoir, par exemple, quelle est l'espèce de vert qui doit paraître dans le troisième anneau, il suffira d'appliquer la règle sur πρσφ, puis de la faire passer sur quelques parties du bleu en π et du jaune en ρ : alors on trouvera que le vert visible à cette épaisseur du corps est principalement composé de vert primitif, mêlé d'un peu de bleu et de jaune.

« On peut aussi connaître par cette méthode comment les couleurs doivent se succéder à partir du centre des anneaux : car, si l'on fait successivement mouvoir la règle depuis AH à travers toutes

les distances, après qu'elle aura passé par-dessus le premier espace, qui ne désigne que peu ou point de réflexion causée par les corps les plus minces, elle arrivera précisément à 1, c'est-à-dire au violet, bientôt au bleu et au vert qui, conjointement avec ce violet, composent du bleu; ensuite au jaune et au rouge qui, conjointement avec ce bleu, composent du blanc. Ce blanc règne jusqu'à ce que le bord de la règle arrive à 3; mais les couleurs dont il est composé venant à manquer successivement, il se change d'abord en jaune composé, puis en rouge, et ce rouge disparaît enfin en L.

« Là commencent les couleurs du second anneau. Plus vives que celles du premier, parce qu'elles sont dilatées et mieux séparées l'une de l'autre, elles se succèdent par ordre, tandis que le bord de la règle passe de 5 en O. Par la même raison, au lieu de blanc paraît entre le bleu et le jaune un mélange d'orange, de jaune, de vert, de bleu et d'indigo, duquel doit résulter un vert lavé et imparfait.

« De même, les couleurs du troisième anneau se succèdent par ordre. D'abord vient le violet : un peu mêlé au rouge du second anneau; il forme une espèce de pourpre rougeâtre. Ensuite viennent le bleu et le vert : moins mêlés à d'autres couleurs, ils sont plus vifs que les précédents, surtout le vert. Suit le jaune, dont la partie du côté du vert est distincte, mais dont la partie du côté du rouge forme un jaune qui, mêlé au violet et au bleu du quatrième anneau, compose différentes nuances d'un rouge pourpre : ce violet et ce bleu, qui devraient succéder à ce rouge, se trouvent confondus avec lui. Vient un vert d'abord fort bleuâtre, ensuite assez franc : c'est la seule couleur vive et pure qui paraisse dans ce quatrième anneau; mais bientôt il commence à tirer sur le jaune, et à se mêler aux couleurs du cinquième anneau. A raison de ce mélange, le jaune et le rouge, qui viennent immédiatement après, sont très-faibles et indécis, particulièrement le jaune, qui étant la plus faible des couleurs, est à peine sensible. Après cela les différents anneaux et leurs couleurs s'entremêlent et se confondent de plus en plus, jusqu'à ce que, après trois ou quatre révolutions, où le bleu et le rouge dominent, tous les rayons hétérogènes mêlés assez également, composent un blanc uniforme. »

Il est facile de déterminer par la même méthode les teintes élémentaires des anneaux réfractés.

On voit, à l'aide de cette figure, que les anneaux colorés doivent

disparaître à une certaine épaisseur : car, à mesure que l'épaisseur croît, le nombre des teintes réfléchies ou réfractées augmente ; et il existe une épaisseur où toutes les teintes sont à la fois réfléchies ou réfractées, et, par conséquent, où l'on ne peut plus apercevoir que de la lumière blanche.

1409. Cette construction fait connaître l'ordre et l'espèce des couleurs simples qui sont réfléchies ou transmises à chaque épaisseur ; mais, pour en déduire les teintes qui résultent de ces mélanges, il faudrait connaître la loi suivant laquelle varie l'intensité de la lumière dans l'étendue de chaque anneau : alors, connaissant le nombre et l'intensité des couleurs, à l'aide de la construction fig. 783, on déterminerait la nature et l'intensité de la teinte résultante. C'est ce que Newton a fait; mais il n'a point publié la méthode qu'il avait employée pour déterminer la loi des intensités de la lumière dans l'épaisseur des anneaux, ni même l'énoncé de cette loi. M. Biot est arrivé exactement aux résultats de Newton, en supposant que le carré de l'intensité est proportionnel aux ordonnées d'un cercle décrit sur l'épaisseur de l'anneau comme diamètre.

Voici la table des teintes correspondantes à différentes épaisseurs d'air, d'eau et de verre, telle que Newton l'a donnée.

	COULEURS RÉFLÉCHIES.	ÉPAISSEURS DES LAMES en millionièmes de pouces anglais		
		D'AIR.	D'EAU.	DE VERRE.
1er ORDRE.	Très-noir	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{10}{51}$
	Noir	1	$\frac{3}{4}$	$\frac{20}{51}$
	Commencement de noir	2	1 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{2}{7}$
	Bleu	2 $\frac{1}{5}$	1 $\frac{4}{5}$	1 $\frac{18}{20}$
	Blanc	5 $\frac{1}{4}$	3 $\frac{7}{8}$	3 $\frac{2}{5}$
	Jaune	7 $\frac{1}{9}$	5 $\frac{1}{8}$	4 $\frac{3}{5}$
	Orangé	8	6	5 $\frac{1}{6}$
	Rouge	9	6 $\frac{1}{4}$	5 $\frac{4}{5}$
2e ORDRE.	Violet	11 $\frac{1}{6}$	8 $\frac{3}{8}$	7 $\frac{1}{5}$
	Indigo	12 $\frac{3}{6}$	9 $\frac{3}{8}$	8 $\frac{2}{11}$
	Bleu	14	10 $\frac{1}{2}$	9
	Vert	15 $\frac{1}{8}$	11 $\frac{1}{3}$	9 $\frac{3}{7}$
	Jaune	16 $\frac{2}{7}$	12 $\frac{1}{5}$	10 $\frac{2}{5}$
	Orangé	17 $\frac{2}{9}$	13	11 $\frac{1}{9}$
	Rouge éclatant	18 $\frac{1}{3}$	13 $\frac{3}{4}$	11 $\frac{3}{6}$
	Écarlate	19 $\frac{2}{3}$	14 $\frac{3}{4}$	12 $\frac{2}{3}$
3e ORDRE.	Pourpre	21	15 $\frac{3}{4}$	13 $\frac{10}{20}$
	Indigo	22 $\frac{1}{10}$	16 $\frac{4}{7}$	14 $\frac{1}{4}$
	Bleu	23 $\frac{2}{5}$	17 $\frac{11}{20}$	15 $\frac{1}{10}$
	Vert	25 $\frac{1}{8}$	18 $\frac{3}{10}$	16 $\frac{1}{4}$
	Jaune	27 $\frac{1}{7}$	20 $\frac{1}{3}$	17 $\frac{1}{2}$
	Rouge	29	21 $\frac{3}{4}$	18 $\frac{3}{7}$
	Rouge-bleuâtre	32	24	20 $\frac{1}{3}$
4e ORDRE.	Vert-bleuâtre	34	25 $\frac{1}{2}$	22
	Vert	35 $\frac{2}{7}$	35 $\frac{1}{2}$	22 $\frac{3}{4}$
	Vert-jaunâtre	36	27	23 $\frac{2}{9}$
	Rouge	40 $\frac{1}{3}$	30 $\frac{1}{4}$	26
5e ORDRE.	Bleu-verdâtre	46	34 $\frac{1}{2}$	29 $\frac{2}{3}$
	Rouge	52 $\frac{1}{3}$	39 $\frac{3}{8}$	34
6e ORDRE.	Bleu-verdâtre	58 $\frac{3}{4}$	44	38
	Rouge	65	48 $\frac{3}{4}$	42
7e ORDRE.	Bleu-verdâtre	71	53 $\frac{1}{4}$	45 $\frac{4}{5}$
	Rouge	77	57 $\frac{3}{4}$	49 $\frac{2}{3}$

1410. Au moyen de cette table, on peut déterminer l'épaisseur d'une lame mince, lorsqu'on connaît la couleur qu'elle réfléchit sous l'incidence perpendiculaire et son indice de réfraction.

En effet, en désignant par e' l'épaisseur d'air qui réfléchit la même teinte, et par e l'épaisseur cherchée, on a

$$e = e' . \frac{n'}{n},$$

n' étant l'indice de réfraction de l'air, et n celui de la substance. Par exemple, si l'on prend une lame de mica assez mince pour réfléchir le bleu du 3e ordre, on aura, d'après la table précédente, $e' = 23,4$; et, comme pour l'indice de réfraction du mica, on a

$$\frac{n}{n'} = 1,53,$$

il en résulte

$$e = \frac{23,4}{1,53} = 15,3.$$

1411. Les anneaux colorés qui se forment dans une lame d'air comprise entre deux prismes, présentent un phénomène fort singulier en apparence, mais qui s'explique parfaitement au moyen de ce qui précède. Si l'on fait tourner les prismes de manière à rendre les rayons incidents de plus en plus obliques à la lame d'air, on voit les anneaux s'élargir de plus en plus autour de la tache centrale; mais les teintes qui les composent se rapprochent peu à peu, et on arrive à un terme où les couleurs ont disparu; alors on n'aperçoit que des anneaux blancs et noirs; en continuant le mouvement des prismes les teintes se reproduisent, mais dans un ordre inverse. Nous avons vu que, quand des rayons de différentes teintes tombent sur une lame d'air sous la même incidence, les diamètres des anneaux de même ordre vont en décroissant du rouge au violet. Ce parallélisme des rayons incidents a sensiblement lieu dans les lentilles d'un grand rayon : aussi, dans un même anneau, les couleurs ne sont point changées par l'inclinaison des rayons; mais il n'en est point ainsi quand les rayons arrivent à la lame d'air à travers un prisme dont l'angle réfringent est considérable. En effet, les rayons les plus réfrangibles s'inclinent plus que les autres sur la lame d'air; et, comme le diamètre des anneaux croît avec l'inclinaison, on conçoit qu'il existe une inclinaison des rayons émergents, pour laquelle les différences d'incidence des rayons rouge et violet compensent l'inégalité des anneaux qu'ils formeraient sous la même incidence : alors les anneaux extrêmes ont sensiblement

e même diamètre, ainsi que les anneaux intermédiaires, et l'on ne doit apercevoir que des bandes blanches et noires. Mais, sous une plus grande inclinaison, l'influence de l'obliquité augmentant, les anneaux sont d'autant plus grands qu'ils sont plus réfrangibles; et alors la succession des teintes dans les anneaux doit être inverse de celle qui existait avant l'apparition des anneaux blancs.

1412. *Anneaux transmis.* Quant aux anneaux transmis, nous avons donné les lois des épaisseurs à leurs périmètres intérieurs et extérieurs, et il est évident qu'ils doivent être complémentaires des anneaux réfléchis; on doit à M. Arago une expérience qui démontre ce fait avec la dernière évidence. Voici en quoi elle consiste. On prand deux lentilles parfaitement égales, ayant mêmes courbures et mêmes épaisseurs; on les superpose et on les place horizontalement devant un mur blanc; en plaçant l'œil convenablemént et disposant un diaphragme de manière à ne laisser arriver successivement sur le système des verres, que la lumière de la partie supérieure ou de la partie inférieure du mur, on aperçoit des anneaux réfléchis ou transmis; mais, en ôtant le diaphragme de manière à éclairer le système des lentilles en dessus et en dessous, les anneaux disparaissent complétement. Ainsi la superposition des anneaux réfléchis et transmis forme de la lumière blanche.

1413. M. Arago a fondé sur ce principe un moyen, bien plus exact que ceux qui étaient connus, pour déterminer le rapport des intensités de deux lumières. Soient AB (fig. 847) un écran translucide, CD un écran opaque et noirci, PQ un système de deux lentilles égales, maintenu verticalement dans une position fixe, de manière que la lame mince soit dans le prolongement de CD; supposons qu'on ait tracé sur le plan horizontal qui supporte les écrans AB et CD deux lignes YY′ et ZZ′ passant par le centre de la lame mince et également inclinées sur CD; que ces lignes soient divisées en centimètres et en millimètres à partir du centre de la lame d'air : il est évident que, si l'œil est placé en *o* à la hauteur du centre de la lame mince, et les lumières sur des verticales égales passant par YY′ et ZZ′, on verra deux systèmes d'anneaux superposés; et, et si l'on fait varier la distance d'une des lumières, elle atteindra une position dans laquelle les deux systèmes d'anneaux disparaîtront complétement : alors les intensités des deux lumières seront dans le rapport inverse des carrés des distances au centre de la lame mince. Cette méthode n'est applicable qu'à des lumières de même teinte : car autrement les anneaux ne disparaîtraient pas.

1414. *Anneaux multiples.* Lorsqu'on éclaire les plaques avec une bougie ou une lampe, et qu'on observe les anneaux sous une grande inclinaison, on aperçoit plusieurs systèmes d'anneaux placés les uns à côté des autres, dont les centres sont situés dans la direction du plan perpendiculaire aux lames qui passe par l'œil et par le point de contact des plaques. Ces anneaux proviennent des réflexions qu'éprouvent les rayons des premiers anneaux aux surfaces de la plaque supérieure ; on observe en même temps des franges étroites très-faibles, qui traversent les anneaux.

1415. *Anneaux réfléchis à centre blanc.* Quand on forme des anneaux colorés avec une lame mince comprise entre deux corps tels, que l'indice de la lame mince soit plus grand que celui de la lame supérieure, et plus petit que celui de la lame inférieure, par exemple, en plaçant de l'huile de girofle ou de sassafras entre une lame de crown-glass et une lame de flint-glass, ou entre une lame de spath-fluor et une lame de diamant, on obtient par réflexion des anneaux à centre blanc, comme ceux qui se produisent par transmission, quand la lame mince a un indice plus grand ou plus petit que ceux des plaques entre lesquelles elle est interposée. C'est un phénomène extrêmement remarquable, et sur lequel nous reviendrons en parlant du système des ondulations.

1416. *Coloration de la lumière réfléchie par des plaques épaisses.* Newton ayant introduit un rayon solaire dans une chambre obscure, par un orifice circulaire de 9 millimètres de diamètre, il le fit tomber perpendiculairement sur un miroir de verre concave, dont les surfaces étaient concentriques : le rayon de la surface intérieure était d'environ 2 mètres, et la surface extérieure était étamée. Au centre de courbure du miroir, Newton plaça un carton blanc percé d'un très-petit trou pour laisser passer la lumière incidente : en regardant le carton il aperçut quatre ou cinq anneaux colorés concentriques qui environnaient l'orifice; ces anneaux étaient disposés comme ceux qui s'observent par transmission à travers deux objectifs superposés; les couleurs se succédaient dans le même ordre. En répétant l'expérience avec une lumière homogène, il se forma des anneaux concentriques alternativement noirs et de la couleur de la lumière. Une mesure exacte des diamètres des anneaux dans les points les plus brillants fit reconnaître qu'ils suivaient les mêmes lois que ceux qui proviennent des lames minces par transmission : les carrés des diamètres des milieux des anneaux étaient entre eux comme la suite des nombres pairs 0, 2, 4, 6, etc.,

les carrés des diamètres des anneaux obscurs suivaient au contraire la loi des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc., et les valeurs absolues des diamètres des anneaux de même rang et de différentes couleurs, étaient entre eux dans les mêmes rapports que dans les lames minces. Lorsqu'on inclinait le miroir, les anneaux restaient toujours concentriques à l'axe du miroir et, par conséquent, se peignaient sur le carton à des distances de l'orifice d'autant plus grandes que le miroir avait été plus incliné.

Pour que cette expérience réussisse, il faut que le carton soit placé exactement au centre de courbure du miroir : car, lorsqu'on l'écarte de cette position, de manière à l'éloigner ou le rapprocher du miroir, les anneaux s'affaiblissent rapidement. Il faut aussi placer le carton le plus près possible de l'orifice du volet, afin que le point de divergence des rayons soit très-voisin du centre, parce qu'alors le faisceau réfléchi revient presque exactement à l'orifice du carton; si le point de divergence était éloigné, le faisceau réfléchi couvrirait une plus ou moins grande étendue du carton, et ferait disparaître les anneaux.

Ces phénomènes se développent encore quand la seconde surface du miroir n'est point étamée; mais ils ne se produisent point quand on emploie des miroirs métalliques. Ainsi, l'apparition des anneaux dépend des réflexions qui se font à la première et à la seconde surface du miroir. Lorsqu'on fait varier l'épaisseur du miroir, Newton a constaté que les diamètres des anneaux semblables étaient en raison inverse des carrés des épaisseurs.

Ces expériences peuvent être faites sur des miroirs dont les surfaces ne sont pas concentriques; mais il faut placer l'écran de manière que les rayons très-voisins de l'axe rencontrent perpendiculairement la seconde surface, car alors les rayons régulièrement réfléchis retournent par le même chemin : cette condition peut toujours être satisfaite. Mais, quand les deux faces sont planes, les rayons incidents doivent être parallèles, et quand la seconde surface a un plus grand rayon de courbure que la première, sans lui être concentrique, le faisceau incident doit être convergent. Ces phénomènes ont été vérifiés en 1816 par MM. Biot et Pouillet. Le duc de Chaulnes a remarqué que, si on couvrait la première surface du miroir avec un vernis très-léger, les anneaux devenaient beaucoup plus brillants. Le même physicien a aussi découvert que l'on pouvait produire des anneaux colorés avec un miroir métallique, en plaçant devant le miroir et sur le trajet des rayons directs une

lame mince de verre ou de mica. Pour obtenir des anneaux distincts, il faut placer l'orifice du volet au centre de courbure du miroir, et l'écran contre le volet lui-même : les anneaux se dessinent nettement sur le carton, quelle que soit la distance de la lame mince au miroir; mais leur grandeur varie en sens contraire de cette distance. Ces dernières expériences ont également été vérifiées avec beaucoup de soin par MM. Biot et Pouillet. On peut obtenir des franges assez nettes en soufflant sur une glace étamée ordinaire éclairée par une bougie, et plaçant l'œil très-près de la bougie.

Nous avons dû nous borner à un résumé succinct des phénomènes relatifs à la décomposition de la lumière par les lames minces et les lames épaisses; nous renvoyons, pour plus de détails, au quatrième volume du *Traité de physique* de M. Biot, dans lequel les expériences de Newton sont exposées et développées avec le talent habituel de ce célèbre physicien.

§ 5. *Décomposition de la lumière dans son passage près des surfaces des corps* (*diffraction*).

1417. Les rayons de lumière qui rasent la surface des corps sont déviés de leur direction, et cette déviation est accompagnée d'une décomposition analogue à celle que la lumière éprouve en traversant des lames minces. Ces modifications qu'éprouve la lumière portent en général le nom de *diffraction.* On peut observer des effets de diffraction, en regardant la flamme d'une bougie à travers une fente étroite pratiquée dans une feuille de papier noir ; on aperçoit de larges franges irisées qui environnent la flamme : elles sont beaucoup plus nettes lorsqu'on regarde la flamme à travers deux fentes parallèles très-écartées. En plaçant entre l'œil et la flamme d'une bougie éloignée un cheveu vertical très-près de l'œil, on voit de chaque côté de larges bandes colorées. Les phénomènes dont il est question ont été découverts par Grimaldi, et étudiés ensuite par Newton, le docteur Yong et Fresnel; mais c'est à ce dernier qu'on doit la découverte de leurs lois et leur explication. Pour l'instant, nous nous bornerons à exposer les moyens d'observation et les lois des différentes classes de phénomènes dus à la diffraction.

1418. *Moyens d'observation.* Dans toutes les expériences de diffraction, il est important que le corps lumineux soit réduit à une bande très-étroite ou à un cercle d'un très-petit diamètre, parce

que, chaque point lumineux produisant des franges qui dépendent de sa position, lorsque le corps lumineux a des dimensions qui ne sont pas très-petites, les franges résultant de ses différents points se détruisent, ou du moins deviennent diffuses par leur superposition. Lorsqu'on emploie un corps lumineux ayant de grandes dimensions, on place devant lui un écran percé d'un très-petit orifice circulaire ou d'une fente longitudinale : les effets sont les mêmes que si le corps lumineux avait les dimensions de l'orifice. On pourrait aussi placer devant le corps lumineux un écran garni d'une lentille sphérique ou cylindrique : tout se passerait comme si la lumière émanait directement du foyer, qui, dans le premier cas, est un petit cercle, et dans le second une bande très-étroite; mais l'intensité de la lumière est sensiblement la même que si la lumière avait traversé des orifices ayant la forme des images focales, attendu, qu'au delà du foyer, la lumière se disperse dans une étendue angulaire d'autant plus grande que la distance focale est plus petite. Il est toujours avantageux d'opérer dans une chambre obscure.

On peut employer pour foyer de lumière un rayon solaire qui pénètre dans une chambre obscure, après avoir été réfléchi par un héliostat; ou la flamme d'une lampe ordinaire. On peut aussi se servir d'une lampe à alcool, dans laquelle on suspend verticalement un fil de platine : le fil acquiert un grand éclat, la lumière de la flamme devient insensible et, par conséquent, on n'a pas besoin d'un écran pour réduire les dimensions du foyer de lumière. Pour opérer sur des rayons de différentes teintes, on place en un point quelconque du trajet des rayons, ou près de l'œil, un verre coloré de la teinte qu'on veut obtenir. Pour avoir une lumière plus vive, on peut employer la lampe monochromatique.

Le faisceau de lumière émané du foyer, ainsi réduit presque à un point ou à une ligne lumineuse, est ensuite reçu sur un écran percé d'orifices de différentes formes, qu'on place à différentes distances. Ces orifices sont tantôt des fentes étroites, formées par deux plaques, dont l'une est mobile à l'aide de deux vis de rappel, au moyen desquelles on peut faire varier la distance et l'inclinaison des bords voisins, et qui peut servir à mesurer la largeur de l'orifice; tantôt des orifices circulaires de différents diamètres; tantôt des orifices d'un grand diamètre traversés par des fils verticaux de différents diamètres; tantôt enfin, des orifices d'un grand diamètre recouverts de plaques de verre sur lesquelles on a collé des disques

opaques. Comme les apparences varient avec la distance de l'écran au foyer de lumière, il est utile de placer les écrans sur une règle horizontale fixe, divisée, le long de laquelle ils peuvent se mouvoir; et comme, dans le cas où on emploie des fentes ou des fils, il est nécessaire que leur direction soit exactement celle du trait lumineux, il faut que l'écran mobile puisse prendre dans son plan différentes inclinaisons, afin que l'on puisse établir le parallélisme en question.

C'est au delà de ce dernier écran que l'on observe les franges. Elles pourraient être reçues sur un écran blanc et opaque, ou sur un verre légèrement dépoli placé en avant de l'œil; on peut aussi les observer à l'œil nu. Mais il est plus avantageux de les regarder dans l'espace avec une loupe : les franges ainsi observées sont absolument semblables à celles qui se forment sur un verre dépoli; mais elles sont grossies et plus brillantes, et on les distingue dans une foule de circonstances où on ne pourrait pas les apercevoir sur un écran, à cause de leur finesse et de la faiblesse de la lumière. Dans toutes les observations de franges à la loupe, il faut avoir soin de faire tomber le foyer lumineux de la lentille au milieu de la pupille, en la tenant à une distance telle que toute sa surface soit éclairée, et chercher dans l'espace les franges qu'on veut observer (Fresnel).

Pour mesurer les distances des franges, Fresnel se servait d'un appareil composé d'une plaque de cuivre mobile à frottement doux entre deux rainures fixes; cette plaque était percée à son centre d'une ouverture d'un centimètre de diamètre, sur les bords de laquelle étaient fixés d'un côté un fil de soie écrue qui servait de point de mire, et de l'autre un petit tuyau qui portait la loupe que l'on pouvait éloigner ou rapprocher du fil jusqu'à ce qu'il se trouvât à son foyer; la plaque était dirigée dans son mouvement par une vis micrométrique exécutée avec beaucoup de soin, et dont la hauteur du pas était connue exactement. Pour mesurer l'intervalle des milieux de deux bandes brillantes, on amenait successivement le fil sur le milieu de la première bande et sur celui de la seconde, en prenant note chaque fois, de la division du cadran à laquelle répondait l'aiguille et du nombre de tours que la vis avait exécutés.

1419. *Appareil de M. Soleil.* Cet appareil peut servir à vérifier toutes les expériences relatives à la diffraction. AB (fig. 1029) est une règle en cuivre, bien dressée, divisée en centimètres

et millimètres sur toute sa longueur; elle est soutenue par des pieds fixés à une table en bois. La règle porte trois pièces C, D, E, qui peuvent glisser le long de la règle. La première (fig. 1030) se compose d'une plaque de cuivre rectangulaire, mobile dans son plan autour du point *a* à l'aide de la vis *a'*, qui presse un prolongement de la plaque, maintenu contre la vis par un ressort; elle se termine par deux plaques fixes qui embrassent la règle; l'ouverture *b* porte une double coulisse destinée à recevoir de petites plaques de cuivre garnies de rainures, de trous ou de lentilles, à travers lesquels passe la lumière de la source. La pièce D, destinée à recevoir les objets qui doivent agir sur la lumière, est disposée comme la pièce C; seulement elle est susceptible de plusieurs autres mouvements, qui permettent de mettre dans l'axe du faisceau de lumière les corps ou les orifices qui doivent le modifier; *c*, vis au moyen de laquelle on peut élever ou abaisser la plaque mobile *d*, sur laquelle reposent les plaques de diffraction; *f*, bouton destiné à faire tourner la plaque D dans son plan; *g*, bouton d'une vis de rappel qui fait mouvoir la plaque parallèlement à elle-même : indépendamment de ces mouvements, elle peut tourner autour d'un axe vertical. Enfin la pièce E (fig. 1032), qui doit porter les loupes à l'aide desquelles on observe les franges, est disposée de la même manière que la précédente; seulement la coulisse dans laquelle elle glisse latéralement est divisée en demi-millimètres : le pas de la vis a exactement cette hauteur, et, comme le tambour est divisé en 50 parties égales, on peut estimer un mouvement de $0^{mm},01$. Pour mesurer la distance des franges, on place dans l'orifice *b* une plaque portant une loupe, et à son foyer un fil très-fin.

La fig. 1033 représente une plaque qui se place dans la pièce C : elle est destinée à faire passer un faisceau de lumière comprise entre des biseaux parallèles dont on peut faire varier à volonté l'écartement. La fig. 1034 représente une autre plaque qui a le même objet; mais elle se place dans le support D; elle porte un micromètre qui sert à mesurer à 1/100 de millimètre l'écartement des biseaux.

Indépendamment de la plaque fig. 1033, on peut placer dans la pièce C des plaques percées de trous de différentes grandeurs, et portant des lentilles sphériques et cylindriques de différentes distances focales.

La fig. 1034 représente quelques-unes des plaques qui se placent dans la pièce D, et dont nous expliquerons plus tard l'usage.

La pièce E ne reçoit que la loupe simple ou micrométrique décrite précédemment, ou une lentille d'un plus long foyer destinée à projeter les franges sur un tableau blanc. Pour ce dernier objet, on se sert d'une lentille terminée par des surfaces cylindriques, dont les axes sont perpendiculaires; celle dont l'axe est vertical étale les franges; l'autre en diminue la hauteur en augmentant leur éclat.

1420. *Franges formées en dehors de l'ombre d'un corps.* Si on place le bord rectiligne d'un écran opaque dans la direction d'une fente traversée par un faisceau de lumière homogène, ou si, la lumière étant quelconque, on regarde les franges avec un verre coloré, on remarque qu'il se forme en dehors de l'ombre des bandes alternativement obscures et colorées, qui se resserrent et s'affaiblissent à mesure qu'elles s'éloignent du bord de l'ombre géométrique. En mesurant les distances de ces bandes au bord de l'ombre, à différentes distances de l'écran, on trouve qu'elles se propagent suivant des hyperboles (fig. 848), dont l'axe réel est la distance du point lumineux au bord de l'écran, le centre au milieu o de cette distance, et dont l'axe imaginaire est représenté, pour les bandes obscures successives relatives à une même teinte, par les racines carrées des quantités $0, d, 2d, 3d, 4d$, etc., et pour les bandes brillantes, par les racines carrées des quantités $1/2\ d$, $3/2\ d$, $5/2\ d$, $7/2\ d$, etc., d étant une quantité qui varie d'une teinte à une autre, suivant les mêmes rapports, que les épaisseurs des lames d'air, qui donnent les anneaux de même ordre dans les lames minces d'air; pour chaque couleur, elle est égale au double de l'épaisseur d'air correspondante à l'anneau du premier ordre. Pour faire ces expériences, on place dans le support D la plaque fig. 1034, dont on écarte les bizeaux de quelques millimètres.

Dans les expériences dont nous venons de rapporter les résultats, on ne peut pas mesurer directement la distance du centre de chaque frange au bord de l'ombre géométrique, attendu que le bord de l'ombre apparente ne coïncide pas avec l'intersection du plan des franges par un plan passant par la ligne lumineuse et le bord de l'écran; mais Fresnel a calculé cette distance de la manière suivante. Il employait une ouverture terminé par deux bords parallèles suffisamment écartés, la moitié de la distance de deux franges symétriques donnait la distance de chacune d'elles au plan qui passait par le milieu de l'ouverture; et comme on connaissait sa largeur et sa distance à la ligne lumineuse et au plan des franges,

on en déduisait la largeur de sa projection géométrique, et, par suite, la distance de chaque frange à l'ombre géométrique de l'arête correspondante.

Il résulte de là, qu'en désignant par k un nombre constant pour une bande brillante ou obscure d'une teinte quelconque, par A la distance du bord de l'écran à la ligne lumineuse, par y la distance du centre de la frange à l'ombre géométrique à une distance x du point o, on aura $A^2y^2 - kx^2 = -A^2k$.

La nature et la forme de l'ecran sont sans influence sur la forme et la courbure des lignes suivant lesquelles les franges se propagent.

Les bandes colorées formées par des rayons de différentes teintes étant inégalement espacées, on conçoit facilement que dans la lumière blanche, elles se superposeront en partie et produiront des teintes variées.

1421. *Franges produites par une ouverture très-étroite.* Lorsqu'une lumière homogène passe successivement à travers deux fentes très-fines parallèles (fig. 849), les franges brllantes se propagent sensiblement suivant des lignes droites qui passent par le centre de l'orifice AB; toutes les bandes brillantes et obscures ont la même largeur, et cette largeur est proportionnelle à la distance à la fente.

Les distances des centres des bandes brillantes à l'axe du faisceau croissent comme les quantités $\frac{d}{2v}, \frac{3d}{2v}, \frac{5d}{2v}, \frac{7d}{2v}$, etc.; les distances des centres des bandes obscures varient comme les quantités $\frac{d}{v}, \frac{2d}{v}, \frac{3d}{v}$, etc., v étant la largeur de la fente, et d une quantité constante pour le même rayon lumineux, et égale au double de l'épaisseur de la lame d'air correspondant au milieu de la largeur de l'anneau réfléchi du premier ordre. Ainsi les largeurs des franges sont en raison inverse de la largeur de l'orifice.

Si la fente était formée par deux lignes inclinées, les franges reçues sur un plan parallèle à la fente iraient en s'écartant les unes des autres, à mesure qu'elles se rapprocheraient de la partie la plus étroite de la fente. C'est une conséquence évidente de la loi relative à l'influence de la largeur de la fente. On peut vérifier ces expériences au moyen de la plaque n° 1 (fig. 1034) qu'on place dans la pièce D.

1422. *Franges produites par deux fentes étroites parallèles et très-voisines.* Les franges se propagent suivant des nappes hyper-

boliques dont les foyers sont sur les deux fentes lumineuses (fig. 850). Les franges brillantes et obscures ont sensiblement la même largeur; pour toutes les teintes, elles sont en raison inverse des distances des fentes entre elles. A une même distance des fentes, les distances des centres des franges brillantes à l'axe du faisceau varient comme les nombres d, $3d$, $5d$, $7d$, etc., et les centres des bandes obscures comme les nombres 0, $2d$, $4d$, $6d$, etc., d ayant la même valeur que précédemment.

1423. Indépendamment du système de franges dont nous venons de parler, chaque fente produit encore des franges comme si elle existait seule; mais ces dernières sont très-faibles, surtout vers la partie centrale du faisceau, où les franges résultant des deux faisceaux sont si brillantes. Quand on éloigne progressivement les deux fentes, les franges centrales se resserrent, s'affaiblissent, et finissent bientôt par disparaître, pour ne laisser subsister que celles qui résultent de chaque fente. Si l'on élargit les fentes, ces deux systèmes de franges s'affaiblissent rapidement, et il se forme alors quatre nouveaux systèmes de franges identiques avec celles qui naissent du bord d'un écran indéfini dans un sens.

1424. Les franges qui se forment symétriquement autour de l'axe du faisceau résultent de l'influence des deux faisceaux de rayons qui passent par les deux fentes : car, si l'on bouche une des fentes avec un écran opaque, elles disparaissent. Si l'on considère un point d'une frange obscure, la suppression d'un des deux faisceaux rend ce point moins sombre : ainsi un même point éclairé par deux faisceaux de lumière peut être plus sombre que quand il est éclairé par un seul. Quand on place une lame de verre ou d'un corps transparent quelconque sur une des fentes, si la lame a une épaisseur qui dépasse 1/10 de millimètre, les franges disparaissent comme si l'écran était opaque, tandis qu'elles ne changent pas si les deux fentes sont couvertes en même temps par le même écran transparent. Enfin, si l'on recouvre une seule fente avec une lame transparente très-mince, par exemple avec une lame mince de mica, les franges subsistent; mais elles sont déplacées : le centre du système de franges se porte du côté de la lame mince, et d'autant plus que cette lame a une plus grande épaisseur.

1425. On peut obtenir les franges qui résultent de l'influence de deux faisceaux lumineux très-peu inclinés l'un sur l'autre par un procédé différent qu'il est bon de connaître. On prend un prisme de verre ABC (fig. 851 A) dont l'angle A diffère très-peu de 180°, et

on l'éclaire par une fente étroite parallèle aux arêtes. La lumière, après avoir traversé le prisme, se dévie vers l'arête A, et les faisceaux se comportent comme s'ils partaient de deux points P et P' très-rapprochés. Comme il faut que la convergence des deux faisceaux soit très-petite, les angles en B et C doivent être très-petits; on peut d'ailleurs diminuer la convergence des rayons pour un prisme donné, en le plaçant dans un vase plein d'eau terminé par deux glaces parallèles. Cette expérience est due à M. Arago.

1426. *Franges produites par un corps très-étroit.* Lorsqu'un faisceau de lumière après avoir traversé une fente très-étroite, rencontre ensuite un corps très-mince, tel qu'un fil métallique, un cheveu, l'ombre ne se propage pas en ligne droite, mais en suivant une courbe hyperbolique, comme les franges formées par le bord d'un écran [1420]. Par exemple, d'après Newton, un cheveu de 1/280 de pouce de diamètre, placé à 12 pieds du point lumineux, projetait à 4 pouces une ombre de 1/60 de pouce, plus de quatre fois le diamètre du cheveu; à 2 pieds une ombre égale à 1/28 de pouce, ou onze fois le diamètre du cheveu; à 10 pieds une ombre égale à 1/8 de pouce, trente-cinq fois plus grande que le diamètre du cheveu; tandis que, si la direction de l'ombre eût été rectiligne, l'écran aurait dû être placé à 420 pieds du point lumineux pour que le diamètre de l'ombre fût égal à trente-cinq fois celui du cheveu.

Il se forme en même temps des franges intérieures et extérieures : pour les franges intérieures qui sont suffisamment éloignées des bords de l'ombre, elles sont les mêmes que celles qui proviendraient de deux fentes étroites distantes de l'épaisseur du corps; et pour les franges extérieures, elles diffèrent peu de celles qui se produiraient si l'on supposait successivement le corps indéfiniment prolongé à droite et à gauche. Les franges se propagent alors comme l'indique la fig. 851; mais les franges intérieures sortent de l'ombre, et viennent se mêler avec les franges extérieures. Lorsque le fil a un diamètre variable, la largeur des franges varie en sens contraire du diamètre. Pour vérifier ces expériences on se sert des plaques 2, 3, 4 et 5 que l'on place dans la pièce D; la dernière renferme une aiguille à pointe fine et allongée.

On peut très-facilement découvrir les franges formées dans la lumière d'une étoile un peu brillante par l'interposition d'un corps opaque, et même celles qui se forment dans son ombre, s'il est assez étroit et assez éloigné du spectateur; mais il faut employer

une loupe d'un foyer assez long, de 65 centimètres par exemple, parce que, si le verre était plus convexe, la lumière serait trop affaiblie.

1427. *Anneaux produits par un orifice circulaire.* Si l'on fait passer la lumière d'un point lumineux par un orifice circulaire d'un très-petit diamètre, le centre de la projection de l'orifice est alternativement obscur et coloré lorsqu'on observe à des distances croissantes, et il se forme des franges dans la partie éclairée de l'image et dans l'ombre.

1428. *Anneaux produits dans l'ombre d'un écran circulaire.* Le faisceau de lumière traversant toujours un orifice circulaire d'un très-petit diamètre, si l'on reçoit le faisceau de lumière sur une plaque de verre où l'on a collé un petit disque métallique arrondi au tour, on aperçoit des anneaux intérieurs et extérieurs, et le centre de l'ombre est aussi éclairé que si l'écran n'existait pas; ce centre brillant a une étendue d'autant plus grande que le disque a un plus petit diamètre, et qu'on observe son ombre à une plus grande distance. Lorsque le disque a seulement 3 ou 4 millimètres, on ne voit qu'un point lumineux lors même qu'on est éloigné d'un mètre, et qu'on se sert d'une forte loupe. On emploie pour ces expériences les plaques de verre n°s 6 et 7 (fig. 1034).

1429. *Franges par réflexion.* Les surfaces polies éclairées par un point lumineux, présentent des phénomènes tout à fait semblables à ceux qu'on observe dans la lumière directe. Le champ lumineux réfléchi par le miroir est bordé de franges pareilles à celles qui entourent les ombres des corps. Quand la surface est très-étroite, ou qu'elle a été noircie en y conservant seulement une ligne brillante, on reproduit les phénomènes singuliers d'un faisceau de lumière qui traverse une fente étroite; deux lignes brillantes suffisamment rapprochées, sur la surface d'un miroir noirci dans le reste de son étendue, font naître les mêmes franges que deux fentes pareilles dans un écran. Si, au lieu de noircir une grande partie de la surface réfléchissante, on n'y trace, au contraire, qu'une ligne noire d'une largeur peu considérable, elle produira des franges semblables à celles qu'on observe dans l'ombre d'un corps étroit. Enfin, les phénomènes se passent exactement comme si, la surface du miroir étant transparente, les rayons émanaient réellement de l'image du point lumineux. On peut se servir, pour répéter ces expériences, des plaques n°s 8 et 9 (fig. 1034), renfermant l'un un petit miroir de verre noir dont on peut faire varier l'inclinaison, l'autre

un prisme du même verre dont une des arêtes est remplacée par une petite facette polie, tout le reste est dépoli.

1430. *Franges produites par les réseaux.* Les phénomènes curieux dont nous allons parler ont été observés pour la première fois par Frauenhoffer, le même physicien auquel on doit la découverte si importante des raies du spectre. Les réseaux sont toujours formés d'une série d'intervalles égaux, alternativement opaques et transparents, ou ternes et réflecteurs, suivant que les observations doivent être faites par transmission ou par réflexion. On obtient les premiers, en traçant sur une lame de verre, à l'aide d'un diamant, des traits parallèles très-rapprochés, ou en collant sur le verre une feuille d'or très-mince, et enlevant des lames de métal très-étroites à l'aide d'une pointe fine. Les réseaux de seconde espèce s'obtiennent en traçant sur une plaque métallique polie des raies parallèles. Dans tous les cas, les raies doivent être assez rapprochées pour qu'il y en ait au moins trente dans un millimètre.

On construit facilement des réseaux au moyen de la machine à diviser les lignes droites [6]. Pour tracer des réseaux sur le verre, il faut avoir des pointes de diamant très-fines, ce qu'on rencontre assez difficilement. On est parvenu à tracer sur le verre des réseaux renfermant plus de 400 traits par millimètre. Le n° 9 de la fig. 1035 représente la plaque portant un réseau. Voici maintenant les phénomènes singuliers que produisent les réseaux.

1431. Supposons qu'un faisceau de lumière blanche pénètre dans une chambre obscure par une fente verticale très-étroite, et qu'à une petite distance de l'orifice on place un réseau à raies verticales : le faisceau de lumière blanche, après avoir traversé le réseau, ira former, sur un écran placé derrière, l'image représentée par la fig. 852 ; au centre se trouve une image blanche de la fente, dont les bords sont parfaitement tranchés, comme si le réseau n'existait pas, et de chaque côté les apparences sont exactement symétriques.

L'espace noir B est suivi du spectre C, ayant le violet au dedans et le rouge au dehors; ce sceptre est suivi d'un nouvel espace noir D, au delà duquel se trouve une série de spectres, ayant tous le violet au dedans et qui se superposent en partie; lorsque les spectres sont assez brillants et assez étendus, on y distingue les mêmes raies que dans les spectres formés par réfraction. Mais les mêmes raies ne sont pas à égales distances dans les différents spectres; en désignant par 1 la distance de deux raies dans le premier

spectre, cette distance est 2 dans le second, 3 dans le troisième, etc. Dans les spectres produits par les réseaux, non-seulement les bandes colorées sont disposées dans le même ordre, mais leurs largeurs relatives sont les mêmes; circonstances qui n'existent pas dans les spectres formés par réfraction.

Frauenhoffer a en outre constaté par de nombreuses expériences : 1° que la déviation des franges de même teinte sur l'axe du faisceau était proportionnelle au rang de ces franges, ou à celui des spectres dont elles font partie; 2° que la déviation d'une même frange est en raison inverse de la somme faite de la largeur d'une raie obscure et d'une raie transparente : de sorte qu'en désignant par d la déviation de la frange du 1er ordre d'une certaine couleur, par s la somme des largeurs d'une raie obscure et d'une raie transparente, par k un coefficient constant, et par D la déviation de la frange de l'ordre n, on a $d = k : s$, et $D = nd$; 3° enfin que, si l'une des raies obscure ou transparente est égale à $\frac{1}{n}$ de la somme des largeurs des deux raies, le spectre de l'ordre n disparaît.

1432. Nous avons dit que l'on recevait l'image sur un écran : cette méthode est suffisante tant qu'il ne s'agit que de reconnaître l'ensemble des phénomènes; mais pour apercevoir les raies des différents spectres et pour mesurer leurs distances, il faut observer les spectres avec une lunette. Frauenhoffer se servait de l'appareil fig. 853. ABCD est un cercle divisé, fixé horizontalement, dont le limbe peut être parcouru par une alidade portant une lunette dont le foyer est traversé par un fil vertical; au centre du cerle est placé le réseau qui reçoit le faisceau de lumière. En faisant mouvoir la lunette de manière à faire coïncider le fil avec une raie quelconque d'un des spectres, on obtient immédiatement l'angle du faisceau élémentaire suivant lequel la raie se propage, avec l'axe du faisceau. On pourrait aussi employer le micromètre de Fresnel décrit précédemment.

Cette déviation étant assez petite, on peut la mesurer avec une approximation suffisante par plusieurs moyens qui n'exigent pas d'appareils si parfaits. Nous les décrirons avec détail, parce que la déviation se trouve liée à d'autres éléments importants qui peuvent facilement s'en déduire.

La première méthode est celle de M. Babinet; elle consiste à éclairer le réseau par deux bougies, au devant desquelles se trouvent deux fentes ayant à peu près un millimètre de largeur (fig. 1036) :

l'œil étant placé très-près du réseau apercevra les deux fentes éclairées, et, de chaque côté, deux systèmes de spectres, qui se superposeront. Mais si l'une des fentes est un peu plus élevée que l'autre, les deux systèmes de spectres ne coïncideront que dans une partie de leur hauteur, et on pourra facilement distinguer les ordres des raies qui se trouveront sur la même ligne. Alors, en faisant varier la distance au réseau de la plaque qui renferme les deux fentes, il sera toujours possible d'établir la coïncidence entre deux mêmes raies de deux spectres de même ordre; la déviation de chacune d'elles sera évidemment égale à $i : 2l$, en désignant par i la distance des deux orifices, par l leur distance au réseau, et en prenant la tangente pour l'angle. Si l'on faisait coïncider deux raies appartenant, l'une à un spectre de l'ordre n, l'autre de l'ordre n', en désignant par d la déviation de la même raie pour le premier spectre, on aurait évidemment $d\ (m+n) = i : l$.

Ces expériences peuvent se faire facilement au moyen de l'appareil de M. Soleil; on place dans le support C la plaque (fig. 1034) garnie de deux fentes, qu'on peut raccourcir par le haut ou par le bas.

On pourrait aussi déterminer la déviation en n'employant qu'un seul orifice. On placerait en avant du réseau un écran percé d'une fenêtre rectangulaire dont la largeur serait bien connue, et on le ferait mouvoir jusqu'à ce que les arêtes verticales vinssent passer par les raies de l'ordre n : en désignant par d la déviation de la raie du premier ordre, par l la distance de l'écran au réseau, par i la largeur de l'orifice, on aurait évidemment $2nd = i : l$, ou $d = i : 2ln$.

1433. Si le réseau, au lieu d'être formé de raies parallèles, était formé de cercles concentriques également espacés, et qu'il fût éclairé par un orifice circulaire, l'œil étant placé sur la ligne qui joint le centre des cercles avec le centre de l'orifice, on apercevrait une série d'anneaux concentriques, dont les distances au centre seraient les mêmes que les distances des franges à l'axe dans le cas des réseaux ordinaires.

Les reflets irisés de la nacre de perle, ainsi que ceux des plumes de certains oiseaux, sont dus à des réseaux. Pour la nacre de perle, M. Brewster l'a demontré, en prenant l'empreinte de la surface de la nacre polie sur du mastic ou un alliage fusible à une basse température : l'empreinte produit les mêmes phénomènes de couleurs. Ces réseaux paraissent dus à la structure feuillée de la nacre. On a imaginé en Angleterre de faire des boutons dont les

surfaces étaient couvertes de réseaux très-fins, obtenus par la compression d'un réseau tracé sur de l'acier trempé; à la lumière du soleil ou des bougies, ces boutons réfléchissent les couleurs les plus brillantes.

1434. *Effets produits par des poudres étalées sur une lame de verre, ou par des fibres très-déliées groupées confusément.* Si, après avoir humecté légèrement avec l'haleine une lame de verre, on y verse de la poudre de lycopode, une couche très-mince de cette poudre restera adhérente au verre, et si l'on place la lame de verre entre l'œil et la flamme d'une bougie, on apercevra de grands anneaux colorés, assez nettement terminés. Ces anneaux sont beaucoup plus réguliers quand le faisceau de lumière provient de la flamme d'une lampe, devant laquelle on a placé un écran opaque percé d'un orifice circulaire de un à trois millimètres de diamètre. Les mêmes phénomènes sont produits par une lame de verre légèrement dépolie; par les petits globules d'eau que l'haleine dépose sur le verre; ou par des poils très-fins, tels que ceux de lièvre, etc., placés entre deux lames de verre. M. Delezene, qui a fait beaucoup d'expériences sur ces anneaux, a reconnu que leur netteté dépend surtout de l'égalité des petits corps placés les uns à côté des autres; que les anneaux qui se forment dans la lumière blanche et dans la lumière homogène suivent exactement les mêmes lois que les franges formées par des réseaux à raies parallèles. Les diamètres des anneaux d'une même teinte sont proportionnels à leur ordre. Mais, chose fort remarquable, les diamètres des anneaux sont indépendants du plus ou moins de rapprochement des globules, ils sont les mêmes, de quelque manière que la plaque de verre en ait été recouverte.

Ces phénomènes se comprendraient facilement, si la poudre étalée sur le verre était formée de grains sensiblement de même grosseur et en contact : car, dans la direction de chaque ligne tracée sur le verre, à partir du centre du faisceau de lumière, les intervalles obscurs étant égaux ainsi que les intervalles transparents, il devrait se former des anneaux colorés comme dans les réseaux circulaires; et, l'égalité des petits grains n'étant jamais parfaite, leur distribution toujours plus ou moins irrégulière, on comprendrait pourquoi les anneaux n'auraient jamais la netteté de ceux qui sont formés par des réseaux circulaires. Mais, comme les diamètres des anneaux sont indépendants de la distance des globules, la théorie des réseaux parallèles ne leur est point applicable.

1435. Yong, qui a beaucoup observé ces phénomènes, avait supposé, que les diamètres des anneaux d'une même teinte et d'un même ordre étaient proportionnels aux diamètres des globules ou des fibres, et il avait construit d'après cela un instrument auquel il avait donné le nom d'*ériomètre*, au moyen duquel on pouvait déterminer le rapport des diamètres des grains des poudres très-fines ou des poils des animaux. L'appareil est disposé de manière à observer, dans chaque cas, le diamètre d'un anneau coloré de même ordre. Il se compose d'une règle horizontale divisée, sur laquelle glissent trois pièces mobiles : l'une porte un écran percé d'un petit trou où l'on place l'œil ; le second, un diaphragme percé d'une large fente verticale à travers laquelle on aperçoit une partie de tous les anneaux, et autour de son centre d'une série de petits orifices disposés circulairement ; enfin sur la dernière se trouve la plaque de verre sur laquelle la poudre est étalée, ou les plaques qui renferment les fibres. On éclaire le corps comme nous l'avons dit précédemment, et on fait mouvoir le second diaphragme de manière que le même anneau coïncide avec les orifices disposés circulairement : il est évident qu'en désignant par l et l' les distances du second diaphragme à l'œil, lorsque cette condition a été remplie pour deux substances différentes, et pour un anneau de même teinte et de même ordre, et par d et d' les déviations ou les rayons des anneaux, on a $d : d' :: l' : l$.

Mais ce mode d'expériences suppose deux choses : 1° que les anneaux suivent exactement les lois des franges des réseaux ; 2° que, dans les effets produits par les poudres et les filaments, le rapport entre les parties opaques et transparentes est toujours le même, car pour les réseaux, les diamètres des anneaux sont seulement proportionnels à la somme de ces intervalles.

Nous avons déjà dit, que M. Delezene avait reconnu que les anneaux suivaient exactement les mêmes lois que les réseaux. Quant à la dernière supposition, voici comment elle a été constatée par le même physicien. En prenant les précautions convenables pour obtenir de la poudre de lycopode à grains bien égaux, on ne peut jamais produire le cinquième anneau, quoique le quatrième, dans certaines circonstances, ait une intensité qui ne permette pas de supposer que l'anneau suivant disparaisse par sa faible intensité : alors, la cause de sa disparition provenait de ce que chaque intervalle transparent était précisément 1/5 de la somme des intervalles obscurs et transparents, ou le quart de chaque intervalle obscur.

Pour vérifier cette conjecture, il fallait déduire de la déviation la somme d'un intervalle obscur et transparent, puis le diamètre des globules en partant de la loi que nous venons d'énoncer, et vérifier si le diamètre des globules ainsi obtenu coïncidait avec des mesures prises directement au moyen d'un microscope, portant un micromètre au foyer de l'oculaire. Le diamètre moyen d'un globule de lycopode déduit de la déviation est $0^{mm},0272$, et, par une mesure directe on a trouvé $0^{mm},0276$. Les mêmes expériences faites sur du poil de lièvre ont donné les mêmes résultats; par ces deux méthodes différentes on a obtenu $0^{mm},01404$, et $0^{mm},01413$ pour le diamètre de ce poil. Plusieurs autres corps d'une grande ténuité, tels que la carie du blé, les fécules ont confirmé le principe dont il est question.

C'est une chose bien singulière, que le rapport entre les espaces efficaces obscurs et transparents des réseaux globulaires ou filamenteux soit toujours 4, quelles que soient la forme des globules et des filaments et leurs distances; mais les expériences ont été trop multipliées et faites avec trop de soin pour qu'on puisse élever aucun doute à cet égard. (*Mémoires de la Société de Lille*, 1835.)

1436. *Effets produits par des réseaux croisés.* En superposant deux réseaux à raies parallèles identiques, de manière que les raies se coupent à angle droit, on obtient un réseau à mailles carrées; en observant à travers ce réseau un orifice éclairé, on aperçoit un grand nombre de spectres régulièrement distribués. Les réseaux à mailles rondes donnent naissance à des apparences analogues. Ces phénomènes n'ont point encore été étudiés.

1437. *Effets singuliers produits dans les lunettes.* On doit au célèbre astronome W. Herschel la connaissance de plusieurs phénomènes qui paraissent dépendre encore de la diffraction. Lorsqu'on regarde une étoile brillante avec une lunette dont le pouvoir amplifiant dépasse 200, l'étoile paraît parfaitement ronde, bien terminée, et entourée de plusieurs anneaux, alternativement obscurs et lucides, dont les bords semblent légèrement colorés; ces anneaux sont très-serrés et séparés par des intervalles égaux. Depuis, M. Arago a remarqué qu'en enfonçant graduellement l'oculaire dans la lunette, le centre du disque s'obscurcit de plus en plus et devient complétement noir; cette tache s'agrandit, et bientôt un point lumineux apparaît au centre; en continuant le mouvement de l'oculaire, cette tache blanche s'élargit, une nouvelle tache noire se produit au centre, et ainsi de suite. Quand l'étoile est *scintillante*

et que le centre du disque est occupé par une tache noire, on voit de temps à autre le centre devenir momentanément brillant.

Herschel fils a découvert que l'image d'une étoile était modifiée par la grandeur et la forme d'un diaphragme placé au devant de l'objectif : lorsque le diaphragme est circulaire, le disque et les anneaux s'élargissent en raison inverse du diamètre de l'orifice; quand le diaphragme est percé d'un orifice ayant la forme d'un triangle équilatéral, l'image circulaire est accompagnée de six rayons régulièrement placés; des orifices de toute autre forme donnent naissance à des apparences très-variées.

Ces phénomènes singuliers semblent résulter de l'interférence des rayons qui rasent les bords des orifices des diaphragmes; mais il y a une circonstance qui paraît difficile à expliquer, c'est l'accroissement du diamètre de l'image à mesure que l'étoile est plus brillante.

§ 6. *Double réfraction.*

1438. Tous les cristaux transparents dont la forme primitive n'est ni le cube, ni l'octaèdre régulier, ni le dodécaèdre rhomboïdal, jouissent de la propriété de donner deux images des objets vus à travers leur épaisseur; ce phénomène, qui indique que les rayons en pénétrant leur substance se divisent en deux parties, porte le nom de *double réfraction*. De toutes les substances connues, celle qui produit ce phénomène avec le plus d'énergie est la chaux carbonatée rhomboïdale (spath d'Islande). Comme d'ailleurs cette substance est assez répandue, nous nous en servirons pour décrire les phénomènes dont il s'agit.

1439. *Propriétés optiques de la chaux carbonatée.* Les cristaux de chaux carbonatée ont ordinairement la forme d'un prisme rhomboïdal (fig. 834), dont l'angle dièdre obtus est de 105° 5'. Si l'on place un rhomboïde de chaux carbonatée sur un papier où l'on ait tracé des points et des lignes, en les regardant à travers le cristal on aperçoit deux images égales, de quelque manière qu'on place le cristal. Il résulte de là, que les rayons émanés de chaque point des objets se divisent en deux faisceaux distincts d'égale intensité. Une des deux images est plus déviée que l'autre, et paraît plus rapprochée : cette dernière circonstance est une conséquence nécessaire de la première. En effet, nous rapportons toujours la position d'un point lumineux au sommet du cône de lumière qui a

pour base l'ouverture de la pupille, et, par conséquent, le lieu d'une image est d'autant plus rapproché que les rayons reçus par l'œil sont plus divergents : or, il est facile de voir que la divergence des rayons qui émergent d'un corps transparent croît avec la déviation. On peut aussi constater l'existence de ces faisceaux en faisant passer dans une chambre obscure un rayon solaire à travers le cristal : on obtient deux images sur un écran.

1440. Les deux systèmes de rayons qui produisent les deux images ne suivent pas les lois ordinaires de la réfraction. En effet, quand un point lumineux rayonne à travers une lame de verre à faces parallèles, et que la position du point et de l'œil restent invariablement les mêmes, en faisant tourner la lame sur elle-même, de manière que ses faces restent toujours dans le même plan, l'image ne change pas de place; or, quand on fait cette expérience avec un cristal de spath d'Islande, une des deux images seulement reste immobile : cette dernière est donc formée par des rayons qui suivent les lois ordinaires de la réfraction, et l'autre par des rayons qui suivent d'autres lois. Ces dernières diffèrent totalement des premières : car les plans du rayon réfracté et du rayon incident ne coïncident que dans certaines circonstances, puisque, en faisant tourner le cristal sur lui-même, une des deux images tourne autour de l'autre, et que, sous l'incidence perpendiculaire, les deux images subsistent. Les premiers rayons ont été désignés sous le nom de *rayons ordinaires*, et les autres sous celui de *rayons extraordinaires*.

1441. L'inégalité de puissance réfractive des deux rayons explique un phénomène très-curieux. Si l'on regarde un point lumineux à travers un rhomboïde de spath d'Islande, on voit deux images; et si l'on avance une carte derrière le prisme, l'image la plus éloignée du bord de la carte sera la première à disparaître. Pour expliquer ce fait, soit o un point lumineux placé au-dessous d'un prisme de chaux carbonatée ABCD (fig. 855), ce point envoie des rayons sur toute la surface BC du prisme; soit oa le rayon incident dont le rayon réfracté ordinaire arrive à l'œil, que nous supposerons en c, le rayon extraordinaire correspondant au rayon oa prendra la direction ab', sortira suivant $b'c'$, et, par conséquent, ne passera pas par l'œil; et il est évident qu'il en sera de même de tous les rayons extraordinaires correspondants à des rayons incidents qui rencontreront la surface BC entre a et C; mais il existera toujours un rayon incident oe, dont le rayon réfracté extraordinaire ira passer par le point c. Ainsi les faisceaux émergents qui produi-

sent les deux images proviennent de deux faisceaux incidents distincts (fig. 856), qui se croisent dans l'intérieur du cristal, en éprouvant l'un la réfraction ordinaire, l'autre la réfraction extraordinaire : à l'inspection de la position des deux faisceaux incidents et des images correspondantes, on voit facilement la cause du phénomène en question.

1442. Malus a imaginé un moyen très-simple pour déterminer les positions des rayons réfractés ordinaires et extraordinaires, correspondant à un rayon incident quelconque. Sur une plaque d'ivoire on grave avec un trait fin et noir un triangle rectangle ABC (fig. 857), dont le côté BC soit, par exemple, un dixième de AC ; en posant le rhomboïde sur la plaque d'ivoire, pour chaque position de l'œil, il se trouvera un point F où la ligne A'C', image extraordinaire de AC, coupera l'hypoténuse AB de l'image ordinaire : donc, si l'on prend sur le côté AC une longueur AF' = A'F, le point F' sera celui dont l'image extraordinaire coïncide avec l'image ordinaire du point F, considéré comme appartenant à l'hypoténuse AB. Ainsi, le rayon ordinaire parti du point F et le rayon extraordinaire parti du point F' se confondent après leur sortie, et ne donnent qu'un seul rayon émergent. Chacun des côtés AB et AC étant divisé en un grand nombre de parties égales, et la position des côtés du triangle étant connue par rapport aux arêtes du cristal, il ne restera plus, pour construire les rayons réfractés et le rayon émergent, qu'à tracer sur la surface supérieure du cristal le point commun d'émergence et la direction du rayon émergent. La méthode la plus simple consiste à observer les images à travers une lunette, mobile autour d'un point dont la position est connue par rapport au cristal, et qui est garnie d'un limbe circulaire mobile autour d'un axe vertical : le cristal étant horizontal, l'angle d'émergence sera donné immédiatement par l'observation. On a trouvé ainsi, que dans un cristal de chaux carbonatée, quand le rayon incident était normal, le rayon réfracté extraordinaire était dévié de 6° 12'.

1443. Lorsqu'on fait tourner le cristal sur lui-même, la position de l'œil étant fixe, l'image ordinaire reste fixe, tandis que l'image extraordinaire change de place, sans jamais se confondre avec la première ; mais parmi toutes les positions du cristal, il en est une pour laquelle le rayon extraordinaire se trouve, comme le rayon ordinaire, dans le plan d'incidence. Cette position est évidemment celle pour laquelle une ligne droite située dans un plan mené

par l'œil, perpendiculairement aux faces horizontales du cristal, donne deux images situées sur le prolongement l'une de l'autre. En traçant sur une feuille de papier une ligne, dont le prolongement irait passer par le pied de la perpendiculaire abaissée de l'œil sur son plan, plaçant dessus un rhomboïde, et le faisant tourner sur lui-même, jusqu'à ce que les deux images soient sur le prolongement l'une de l'autre, on trouve que cette circonstance a lieu, quand le plan d'incidence divise en deux parties égales un des angles plans obtus; ou, si le cristal a toutes ses arêtes égales, quand le plan d'incidence passe par les petites diagonales des faces opposées. Ce plan porte le nom de *section principale*.

1444. Dans la section principale (fig. 858) un rayon incident NI normal se divise en deux : l'un, ordinaire, traverse le cristal sans éprouver aucune déviation; l'autre, extraordinaire, est dévié du côté du petit angle B'. Lorsque le rayon est oblique d'un côté ou de l'autre de la normale, le rayon extraordinaire est toujours dévié du même côté; c'est ce qu'il est facile de reconnaître en regardant l'image d'un point, plaçant l'œil dans la section principale et lui donnant toutes les positions possibles : l'image extraordinaire est toujours déviée du même côté de l'image ordinaire.

1445. Supposons maintenant qu'on coupe le cristal par deux plans perpendiculaires à la diagonale passant par les sommets des deux angles trièdres obtus du rhomboïde (fig. 859). Si un rayon pénètre dans le cristal perpendiculairement à l'une des faces artificielles, on trouve qu'il le traverse sans se partager ni se dévier; si le rayon est incliné, il se divise; mais les rayons ordinaire et extraordinaire sont tous deux dans le plan d'incidence. Et, si l'on suppose que le plan d'incidence tourne autour de la normale au point d'incidence, l'angle d'incidence restant constant, l'angle de réfraction ordinaire et celui de réfraction extraordinaire restent aussi constants. Ainsi, les rayons incidents formant un cône droit ayant pour axe la normale, les rayons réfractés ordinairement et extraordinairement forment également deux cônes droits ayant le même axe. Si l'on n'avait enlevé qu'un seul angle solide du cristal, un rayon incident normal entré par la face supérieure sortirait également sans se diviser. On pourrait aussi n'obtenir qu'une seule image dans un cristal où l'on n'aurait pas pratiqué les faces additionnelles dont nous venons de parler : il suffirait de faire varier la position du plan d'incidence et l'angle d'incidence de manière que le rayon réfracté ordinaire eût la direction de la petite

diagonale du rhomboïde ou une direction parallèle. Nous verrons plus tard que le rayon incident devrait être situé dans un plan parallèle à la section principale, et faire avec la normale un angle facile à déterminer. Cette direction est la seule pour laquelle un rayon incident ne donne qu'une seule image.

1446. Il suit de là que, quelle que soit la cause qui produit la division d'un rayon incident dans le cristal, cette cause agit symétriquement autour de la diagonale qui passe par les sommets des deux angles trièdres obtus du rhomboïde : c'est pour cette raison que l'on a désigné cette ligne, ou toute autre qui lui serait parallèle, sous le nom d'*axe du cristal.*

1447. Si l'on taille dans un cristal un parallelipipède rectangle (fig. 860), dans lequel le côté AA′ soit parallèle à l'axe, il est évident que, quand un rayon se présentera pour traverser ce prisme dans un plan perpendiculaire ou parallèle au côté AA′, c'est-à-dire à l'axe, les deux rayons réfractés seront tous deux renfermés dans le plan d'incidence, puisque, dans l'un et l'autre cas, l'axe est symétrique par rapport à ce plan.

En mesurant la déviation par le moyen que nous avons indiqué précédemment, on trouve que, dans le cas où le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe, le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction est constant, pour le rayon extraordinaire comme pour le rayon ordinaire; mais ce rapport n'est pas le même pour les deux rayons. Chacun d'eux pourrait se déduire de ces expériences mêmes; mais on peut les obtenir beaucoup plus exactement, par un procédé analogue à celui que nous avons fait connaître pour déterminer l'indice de réfraction ordinaire des corps solides, en taillant un prisme de manière que ses faces soient parallèles à l'axe.

En désignant par $1/e$ et par $1/o$ les indices de réfraction des rayons extraordinaires et ordinaires, Malus a trouvé que pour la chaux carbonatée on avait

$$e = 0{,}6741717, \quad \text{et } o = 0{,}6044871.$$

Cette loi conduit à une construction géométrique très-simple pour déterminer les deux rayons réfractés. Elle consiste à décrire autour du point d'incidence deux cercles concentriques, ayant pour rayon l'unité divisée par l'indice de réfraction des rayons ordinaire et extraordinaire; à prendre, à partir du point d'incidence, sur la surface du cristal et dans le plan d'incidence, une distance égale à $1 : \sin i$, i étant l'angle d'incidence, et, par le point correspon-

dant, à mener une tangente à chacun des cercles : les points de tangence appartiendront aux rayons réfractés.

En effet, soient NI (fig. 861) le rayon incident, IO le rayon réfracté ordinaire; du point I, comme centre, décrivons deux cercles avec des rayons égaux à o et à e, c'est-à-dire à l'unité divisée par l'indice de réfraction ordinaire et l'indice de réfraction extraordinaire; par le point O, intersection du premier cercle et du rayon ordinaire, menons une tangente OK au cercle, l'angle OKI sera égal à θ, et on aura

$$\mathrm{IK}\sin\theta = \mathrm{IO} = \frac{\sin\theta}{\sin i}; \quad \text{d'où } \mathrm{IK} = \frac{1}{\sin i}.$$

Or, la valeur de IK, étant indépendante de l'indice, restera la même, quel que soit cet indice, et, par conséquent, la construction énoncée se trouve justifiée.

1448. Si maintenant on place le rayon incident dans un plan parallèle à l'axe, on trouve, comme cela devait être, que le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction pour le rayon ordinaire est un nombre constant; mais il n'en est plus de même pour le rayon réfracté extraordinairement. La loi donnée par l'expérience conduit encore cependant à une construction géométrique assez simple pour trouver la direction du rayon réfracté. Autour du point I, comme centre (fig. 862), on décrit un cercle ayant pour rayon l'unité divisée par l'indice de réfraction des rayons ordinaires, que nous avons désigné par o; et sur le diamètre du cercle, comme axe, on décrit une ellipse dont l'autre axe est égal à l'unité divisée par l'indice des rayons extraordinaires, que nous avons désigné par e; on trace le rayon ordinaire IO, la tangente OK et la tangente KE à l'ellipse; le point E appartient au rayon extraordinaire.

En désignant par θ_o et θ_e les angles de réfraction ordinaire et extraordinaire, on trouve, d'après l'expérience,

$$\tang\theta_e = \frac{o}{e}\tang\theta_o.$$

Pour la chaux carbonatée, e est $> o$: par conséquent, le rayon extraordinaire est plus rapproché de la normale que le rayon ordinaire. C'est le contraire de ce que nous avons trouvé quand le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe.

Cette relation s'accorde parfaitement avec la construction indiquée : car, dans l'ellipse la sous-tangente étant indépendante de l'axe perpendiculaire à la ligne sur laquelle on la mesure, les ordonnées des points O et E se confondent, et on a

$$\tang \mathrm{DIO} : \tang \mathrm{DIE} :: o : e, \quad \text{ou } \tang\theta_o : \tang\theta_e :: o : e.$$

Ainsi, dans tous les cas, le rayon ordinaire est donné par une tangente à un cercle décrit avec le rayon o; dans le premier cas, le rayon extraordinaire est donné par une tangente, menée par le même point de la surface du cristal, à un cercle dont le rayon est e, et dans le second, par une tangente à une ellipse dont les axes sont o et e. Mais ces deux constructions n'indiquent rien pour la détermination des rayons réfractés extraordinaires dans des plans d'incidence obliques à l'axe. Huyghens a été conduit par analogie à la construction suivante, qu'il a ensuite vérifiée par l'expérience.

1449. Soient NI (fig. 863) un rayon incident situé dans un plan quelconque; XY la surface du cristal, que nous supposerons d'abord parallèle à l'axe; par le point I on mène une droite MM′ parallèle à l'axe, et on prend $IM = IM' = o$; sur la normale du point d'incidence, on prend $IP = IP' = e$; sur MM′ et PP′ comme axe on décrit une ellipse et on fait tourner cette ellipse autour de MM′ : elle engendre un ellipsoïde de révolution. Cela posé, soit IK l'intersection du plan d'incidence avec la surface du cristal; sur cette droite on prend un point K tel que IK soit égal à l'unité divisée par le sinus de l'angle d'incidence; par le point K on mène dans le plan XY, TT′ perpendiculaire à KI, et par la droite TT′ un plan tangent à l'ellipsoïde : le point de tangence appartient au rayon réfracté extraordinairement. Si l'on construit une sphère sur MM′ comme diamètre, le point de contact avec la sphère d'un plan tangent mené par TT′ sera évidemment un point du rayon ordinaire.

Il est facile de voir que cette solution générale s'accorde parfaitement avec les solutions particulières que nous avons données précédemment.

Cette construction s'applique également au cas où la surface du cristal, sur laquelle se présente le rayon incident, est disposée d'une manière quelconque par rapport à l'axe.

XY (fig. 864) représentant la surface d'incidence, NI le rayon incident, IK l'intersection du plan d'incidence avec la surface du cristal, par le point I on mènera une ligne MM′ parallèle à l'axe, on prendra $IM = IM' = o$, et sur cette droite, comme axe, on décrira un ellipsoïde de révolution dont le rayon à l'équateur soit égal à e; le point K se déterminera comme précédemment; par ce point et dans le plan XY on mènera TT′ perpendiculairement à IK, et le plan tangent à l'ellipsoïde mené par TT′ déterminera

sur la surface de révolution un point du rayon réfracté extraordinairement.

1450. Quant aux rayons émergents, celui qui correspond au rayon ordinaire s'obtiendrait comme si le milieu n'était pas cristallisé; et celui qui correspond au rayon extraordinaire, en traçant au point d'émergence comme centre l'ellipsoïde de révolution, menant un plan tangent à cette surface par le point où elle serait coupée par le rayon extraordinaire, et abaissant une perpendiculaire par le point d'émergence sur la trace de ce plan dans la face d'émergence; sa direction serait celle du plan normal qui contient le rayon émergent, et sa longueur serait $1 : \sin i$, i étant l'angle du rayon émergent avec la normale.

Cette élégante construction, comme nous l'avons déjà dit, a été découverte et vérifiée par Huyghens; depuis, Wollaston et Malus l'ont soumise à de nouvelles épreuves, et l'expérience a confirmé son exactitude.

1451. Dans ce qui précède, nous avons supposé que les rayons lumineux passaient du vide dans le cristal, ou du moins d'une substance peu réfringente dans le cristal. Dans le cas où le cristal est environné d'un milieu quelconque non cristallisé, tous les phénomènes sont encore les mêmes; seulement, à la place des indices de réfraction, il faut substituer le rapport des indices du second milieu à celui du premier.

Examinons maintenant ce qui arriverait si le milieu extérieur était lui-même cristallisé.

Il peut se présenter deux cas : ou le rayon qui se présente pour pénétrer dans le corps cristallisé est ordinaire, ou bien il est extraordinaire. S'il est ordinaire, tout se passera comme si le premier milieu n'était pas cristallisé, et tout ce qui précède lui sera exactement applicable. Mais, si le rayon est extraordinaire, on ne peut pas savoir ce qui arrivera sans avoir recours à l'observation; or, l'expérience a appris que le rayon, en pénétrant dans le second milieu se divise, donne naissance à deux rayons réfractés, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire, et ces deux rayons ont précisément la direction de ceux qui résulteraient de la réfraction du rayon ordinaire correspondant au rayon extraordinaire incident. Pour trouver la direction de ce rayon, il faudra faire la construction d'Huyghens relative au premier milieu; par le point d'intersection de l'ellipsoïde avec le rayon réfracté extraordinaire on mènera un plan tangent à cette surface, et par l'intersection du plan tangent avec la surface

de séparation des deux milieux on mènera un plan tangent à la sphère : le point de contact appartiendra évidemment au rayon ordinaire correspondant.

1452. Lorsqu'un rayon ordinaire ou extraordinaire se réfléchit à la surface inférieure d'un cristal jouissant de la double réfraction, le rayon réfléchi, en rentrant dans le cristal, se comporte comme un rayon ordinaire qui pénètre dans le cristal sous une certaine incidence : par conséquent, il produit deux rayons qui rentrent dans le cristal; l'un est ordinaire, l'autre extraordinaire. Si le rayon incident est ordinaire, il produit d'abord un rayon réfléchi ordinaire pour lequel l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence; quant au rayon réfléchi extraordinaire, on le trouvera facilement en cherchant le rayon extraordinaire qui accompagne le rayon ordinaire réfléchi, à l'aide du calcul ou de la construction que nous avons indiquée. Si le rayon incident est extraordinaire, il faudra chercher le rayon ordinaire correspondant, pour lequel on cherchera les deux rayons réfléchis, comme précédemment. Il suit de là, que les rayons ordinaires et extraordinaires qui s'accompagnent dans l'incidence s'accompagnent encore après la réflexion.

1453. Si l'on voulait déterminer la limite à laquelle commence la réflexion totale pour les rayons ordinaires et pour les rayons extraordinaires, il faudrait pour un point de la surface d'émergence faire la construction d'Huyghens, et mener des plans tangents à la sphère et à l'ellipsoïde par toutes les tangentes d'un cercle tracé sur la surface d'émergence, autour du point d'émergence, avec un rayon égal à l'unité : car, pour les limites correspondantes à un angle d'incidence droit, on a

$$\mathrm{IK} = \frac{1}{\sin\theta} = \frac{1}{1} = 1;$$

et joignant le point d'émergence avec tous les points de tangence, on formera deux cônes qui seront les limites cherchées : celui des rayons ordinaires sera évidemment droit, et aura pour axe la normale; l'autre sera oblique.

1454. Si un rayon, soit ordinaire, soit extraordinaire, se présentait à la face d'émergence sous un angle plus grand que l'angle limite, la construction précédente ne pourrait pas servir à déterminer les rayons réfléchis. Alors en admettant que les rayons réfléchis suivent toujours les mêmes lois avant et après la réflexion

totale, on parviendrait dans tous les cas à déterminer la direction des rayons réfléchis, en supposant le cristal contigu à un milieu plus réfringent, parce qu'alors on pourrait toujours considérer les rayons réfléchis comme étant les rayons réfractés correspondants à un même rayon incident, et la construction précédente [1452] pourrait s'effectuer.

1455. *Double réfraction des autres cristaux.* Dans ce qui précède, il n'a été question que de la chaux carbonatée; mais il existe un grand nombre de cristaux qui jouissent également de la propriété de donner deux images des objets qu'on voit au travers. Les cristaux biréfringents se divisent en deux classes : les uns, comme la chaux carbonatée, n'ont qu'une direction dans laquelle un rayon peut les traverser sans se diviser; les autres en ont deux. On les désigne sous les noms de cristaux à un axe et de cristaux à deux axes.

1456. Les cristaux a un axe jouissent tous des mêmes propriétés que la chaux carbonatée, et tout ce que nous avons dit de cette dernière substance leur est applicable. Mais il y en a dans lesquels le rayon extraordinaire s'écarte de l'axe du cristal, comme dans la chaux carbonatée, et d'autres dans lesquels il s'en rapproche. Les derniers sont désignés sous le nom de cristaux *attractifs* ou *positifs*, les premiers sous celui de cristaux *répulsifs* ou *négatifs*. Ces dénominations proviennent de ce que, dans le système de l'émission, on suppose que la double réfraction résulte d'une force perpendiculaire à l'axe qui s'exerce sur certaines molécules seulement, et qui est tantôt attractive, tantôt répulsive.

1457. Dans les cristaux à deux axes, aucun des rayons ne suit la loi de Descartes. On peut constater ce fait en plaçant sur du papier une plaque d'un de ces cristaux à faces parallèles : lorsque l'œil est immobile et qu'on fait tourner la plaque sur elle-même, aucune des deux images ne reste fixe. Fresnel a démontré ce fait par une expérience plus décisive. Supposons qu'on réunisse plusieurs fragments d'une même substance taillés dans différents sens, et que la masse de ces fragments ait la forme d'un parallélipipède, il est évident que, si un des deux rayons suit la loi de Descartes, la direction de ce rayon sera indépendante de la direction de l'axe dans chaque fragment, et, par conséquent, que l'image ordinaire d'une ligne droite vue à travers le prisme serait droite; or, d'après l'expérience, elle est brisée comme l'image extraordinaire.

Il y a cependant dans les cristaux à deux axes deux plans dans

lesquels un des deux rayons suit la loi de Descartes ; ces deux plans sont perpendiculaires à celui des deux axes, et divisent en deux parties égales les angles qu'ils forment entre eux.

Dans les cristaux à un axe, nous avons vu que tous les phénomènes se développaient symétriquement de part et d'autre de la section principale; la même symétrie se retrouve dans les cristaux à deux axes relativement aux plans perpendiculaires à celui des deux axes, et qui divisent leurs angles en deux parties égales.

1458. J. F. W. Herschel, fils du célèbre astronome, a reconnu que dans un même cristal jouissant de la double réfraction, les axes relatifs aux rayons simples sont distincts les uns des autres; dans les cristaux à deux axes, les bisectrices des angles des axes de tous les rayons coïncident exactement.

1459. On parvient facilement à distinguer les cristaux à un axe des cristaux à deux axes par des phénomènes de couleur dont nous parlerons plus loin. En général, dans les cristaux à un axe, les faces du cristal primitif sont semblablement ou symétriquement placées par rapport à l'axe. Les formes primitives correspondantes aux cristaux à un axe sont le rhomboïde, le prisme hexaèdre régulier, l'octaèdre isocèle à base carrée, et le prisme droit à base carrée. Toutes les autres formes ont deux axes, ou n'exercent point la double réfraction. D'après M. Sorret, de Genève, dans les cristaux à deux axes, le plan des deux axes est toujours disposé d'une manière symétrique par rapport aux faces de la forme primitive, et les axes sont placés dans ce plan de manière à faire des angles égaux avec ces faces.

TABLEAU DES CRISTAUX BIRÉFRINGENTS A UN SEUL AXE.

Positifs.

Zircon.	Suracétate de cuivre et de chaux.
Quartz.	Hydrate de magnésie.
Tungstate de zinc.	Glace.
Stanite.	Hyposulfate de chaux.
Boracite.	Dioptase.
Apophyllite.	Argent rouge.
Sulfate de potasse et de fer.	

Négatifs.

Carbonate de chaux.	Tourmaline.
Carbonate de chaux et de magnésie.	Rubellite.
Carbonate de chaux et de fer.	Corindon.

Saphir.
Rubis.
Emeraude.
Béryl.
Apatite.
Idocrase.
Vernerite.
Mica.
Phosphate de plomb.
Phosphate de plomb arseniaté.
Hydrate de strontiane.
Arseniate de potasse.
Chlorure de calcium.
Chlorure de struntium.
Sous-phosphate de potasse.
Sulfate de nickel et de cuivre.
Cinabre.
Mellite.
Molybdate de plomb.
Octohédrite.
Phosphate de chaux.
Arseniate de plomb.
Arseniate de cuivre.
Néphéline.

CRISTAUX A DEUX AXES.

Noms des substances.	Angle des axes.	
Sulfate de nickel (certains échantillons)	3°	0′
Sulfocarbonate de plomb	»	»
Carbonate de strontiane	6	56
Carbonate de baryte	»	»
Azotate de potasse	5	20
Mica (certains échantillons)	6	0
Talc	7	24
Perle	11	28
Hydrate de baryte	13	18
Mica (certains échantillons)	14	0
Arragonite	18	18
Cyanure de potassium	19	24
Mica (certains échantillons)	25	0
Cymophane	27	51
Anhydrite	28	7
Borax	28	42
Mica. Divers échantillons examinés par M. Biot	30	0
	31	0
	32	0
	34	0
	37	0
Apophyllite	35	8
Sulfate de magnésie	37	24
Sulfate de baryte	37	42
Spermaceti (environ)	37	40
Borax natif	38	48
Azotate de zinc	40	0
Stilbite	41	42
Sulfate de nickel	42	4
Carbonate d'ammoniaque	43	24
Sulfate de zinc	44	28

Noms des substances.	Angle des axes.	
Anhydrite (examinée par M. Biot)	44°	41′
Mica	45	0
Lépidolithe	45	0
Benzoate d'ammoniaque	45	8
Sulfate de soude et de magnésie	46	49
Sulfate d'ammoniaque	49	42
Topaze du Brésil	49 à 50	0
Sucre	50	0
Sulfate de strontiane	50	0
Sulfhydrochlorate de magnésie et de fer	51	16
Sulfate de magnésie et d'ammoniaque	51	22
Phosphate de soude	55	20
Comptonite	56	6
Sulfate de chaux	60	0
Azotate d'argent	62	16
Iolithe	62	50
Feldspath	63	0
Topaze (Aberdecshire)	65	0
Sulfate de potasse	67	0
Carbonate de soude	70	1
Acétate de plomb	70	25
Acide citrique	70	29
Tartrate de potasse	71	20
Acide tartrique	79	0
Tartrate de potasse et de soude	80	0
Carbonate de potasse	80	30
Cyanite	81	48
Chlorate de potasse	82	0
Épidote	84	19
Chlorure de cuivre	84	30
Péridot	87	56
Acide succinique	90	0
Sulfate de fer	90	0

Rochon a fait une application très-remarquable de la double réfraction à la mesure du diamètre apparent des corps, ou à la détermination de leur distance quand on connaît leur grandeur, ou de la grandeur quand on connaît leur distance. Voici le principe et la description de cet instrument.

1460. *Micromètre à double image.* Soient M et N (fig. 865) deux prismes égaux de spath d'Islande, de quartz ou de toute autre substance jouissant de la double réfraction, mais à un seul axe; supposons que la face AB du prisme M soit perpendiculaire à l'axe, et que les faces BC, CD et BD du second prisme lui soient

parallèles. Ces prismes étant appliqués l'un contre l'autre, comme l'indique la figure, il est évident que, si un rayon de lumière *mn* vient rencontrer la surface AB perpendiculairement à sa direction, le rayon pénétrera jusqu'à la surface de séparation des deux prismes sans éprouver ni déviation ni division, puisque l'axe de réfraction du premier prisme est perpendiculaire à la surface AB; mais au point d'incidence *p*, sur la surface du second prisme, comme l'axe est perpendiculaire au rayon lumineux, ce dernier se divisera en deux : le rayon ordinaire continuera sa route sans éprouver de déviation, puisque les deux prismes sont de la même substance, et le rayon extraordinaire sera dévié à gauche ou à droite, suivant la nature du cristal. L'œil ne pourrait pas recevoir les deux rayons émergents provenant d'un même rayon incident; mais il recevra, en même temps que le rayon direct *m*O, un rayon extraordinaire *q*O provenant d'un autre rayon incident *m'n'*, et il apercevra deux images distinctes. Les deux images seront plus ou moins écartées l'une de l'autre, suivant que la double réfraction des deux prismes sera plus ou moins énergique, et que l'angle réfringent sera plus ou moins grand.

Cela posé, soit AA (fig. 866) l'objectif d'une lunette dont l'axe optique prolongé rencontre un objet SS'; soient F et F' les foyers des rayons envoyés par les points S et S', de sorte que FF' est l'image de SS'; plaçons en avant de cette image le double prisme dont nous venons de parler : les rayons ordinaires feront toujours leur foyer en FF', et les rayons extraordinaires formeront une autre image *ff'* dont la distance à la première dépendra de la position du double prisme. En effet, l'angle F*cf* est constant : par conséquent, à mesure que le double prisme s'approche de la lentille A, les deux images s'écartent, et quand il s'en éloigne, elles se rapprochent.

Lorsque FF' coïncide avec *cc'*, les deux images se confondent; et, si l'angle de déviation du prisme est plus grand que le diamètre apparent de l'objet SS' vu du point A, il y a toujours une position du prisme (fig. 867) pour laquelle les deux images sont tangentes : dans ce cas, l'image ordinaire se trouve comprise dans l'angle de déviation F'*c*'F du prisme. Il résulte de là, qu'en mesurant la distance F*c*, que nous désignerons par H, et connaissant l'angle de déviation V du prisme, ainsi que la distance focale D de l'objectif, on en déduira facilement le diamètre apparent x de l'objet, car on a évidemment

$$FF' = D \operatorname{tang} x, \quad FF' = H \operatorname{tang} V;$$

d'où $$\tang x = \frac{H}{F} \tang V.$$

Or, comme pour le même instrument F et V sont constants, il s'ensuit que la valeur de tang x est proportionnelle à H : ainsi on peut écrire tang x = KH. La valeur de K peut se déduire de V et F, qu'on pourrait déterminer directement; mais il est beaucoup plus simple de trouver la valeur de K par l'expérience. Pour cela on commence par placer le prisme de manière que les deux images se superposent, ce qui a lieu quand FF′ coïncide avec cc'; on marque cette position du prisme : c'est évidemment le point à partir duquel la distance H doit être comptée. Ensuite on observe un objet d'une grandeur connue placé aussi à une distance connue, et dont, par conséquent, il est facile de trouver directement le diamètre apparent; on met les deux images en contact, et on mesure la distance H, l'équation tang x = KH donne la valeur de K. Alors, l'échelle étant divisée en millimètres, on pourra dans tous les cas déduire x de H et K. Mais la graduation de l'échelle se fait de manière à donner directement la tangente de l'angle sous-tendu par le diamètre apparent de l'objet; cette graduation s'effectue d'une manière très-simple. Supposons que le diamètre de l'objet observé sous-tende un angle de 20 minutes connu d'avance, on divisera H en 20 parties égales, et le reste de l'échelle en parties égales à celles-là : chaque division correspondra évidemment à des accroissements de l'angle visuel de 1′. Les échelles des micromètres à double image portent, à côté de l'échelle en minute, des nombres qui sont le quotient de l'unité par la tangente de l'angle correspondant : en désignant un de ces nombres par T, par D la distance de l'objet et par d son diamètre, on a évidemment d = D : T, et D = dT. Ainsi, pour obtenir le diamètre d'un objet, il faut diviser sa distance par le nombre de l'échelle correspondant, et pour obtenir sa distance, il faut multiplier son diamètre par ce nombre; d'après la taille moyenne connue d'un homme, on trouvera facilement sa distance.

Dans ce qui précède, nous n'avons point parlé de l'oculaire; mais il est évident qu'il est sans influence, puisqu'il ne fait qu'amplifier les images formées au foyer de l'objectif. La fig. 868 représente une coupe longitudinale et une coupe transversale de la lunette de Rochon.

L'angle V formé par les deux faisceaux à la sortie du prisme peut être dé-

terminé directement : en effet, désignons par a et b les indices de réfraction ordinaire et extraordinaire du cristal, par I l'angle d'incidence sur la face commune des deux prismes, par R l'angle de réfraction du rayon extraordinaire dans le prisme N, par I' l'angle d'incidence sur la face CD du second prisme, et enfin par A l'angle réfringent ABC ou BCD, nous aurons

$$\frac{\sin I}{\sin R} = \frac{b}{a}, \quad \frac{\sin V}{\sin I'} = b, \quad I = A, \quad \text{et } I' = R - A;$$

d'où l'on tire

$$\sin V = b \sin (R - A), \quad \text{et } \sin R = \frac{a}{b} \sin A.$$

Dans le cristal de roche, la déviation est en sens contraire de celle de la figure, et l'on a

$$a = 1{,}5484,$$
$$b = 1{,}5582.$$

Ainsi on pourra trouver l'angle V, quand l'angle A sera connu; c'est ainsi qu'on a formé le tableau suivant :

Valeurs de A.	Valeurs de V.
30°	19′ 30″
40	28 20
50	40 0
60	57 40

On voit, d'après ce tableau, qu'avec un prisme dont l'angle réfringent est de 60°, on ne peut pas mesurer des angles plus grands que 1°.

1461. La lunette de Rochon, disposée comme nous venons de l'indiquer, renferme une imperfection assez grave : l'image extraordinaire, à cause de la déviation qu'elle éprouve, est toujours garnie latéralement de franges colorées, d'autant plus marquées que le double prisme est plus rapproché de l'objectif; alors il est impossible de bien juger du contact des deux images, et l'on pourrait commettre de grandes erreurs en employant cet instrument à la détermination du diamètre apparent du soleil ou de la lune. M. Arago a fait disparaître complétement cet inconvénient en plaçant le double prisme entre l'oculaire et l'œil, et faisant varier le grossissement de la lunette : le prisme étant placé près de l'œil, la dispersion est insensible. Pour faire varier le grossissement, l'oculaire doit être formé de deux verres qu'on peut éloigner ou rapprocher, et, pour chaque distance, le grossissement, déterminé d'avance, est inscrit sur une échelle latérale parcourue par un index entraîné par la lentille mobile. Il est facile de voir qu'en désignant le gros-

sissement par G, et conservant les notations précédentes, on aura

$$V = Gx; \quad \text{d'où } x = V : G;$$

ainsi, quand on connaîtra V et G, on en déduira x.

1462. M. Arago a employé d'une manière très-ingénieuse les doubles prismes dont nous venons de parler pour obtenir le grossissement dans tous les instruments d'optique. Ce procédé consiste à prendre un double prisme de cristal de roche tel que nous l'avons décrit; on le place devant l'oculaire de l'instrument, et l'on regarde une mire circulaire éloignée, d'un diamètre connu : on aperçoit deux images distinctes. Alors on s'approche ou l'on s'éloigne de la mire jusqu'à ce que les deux images soient tangentes : dans cette position, les rayons partis des extrémités de l'objet sortent de l'instrument en faisant un angle égal à l'angle de déviation du prisme. Cet angle étant connu, il ne restera plus qu'à le diviser par le diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu pour avoir le grossissement.

1463. L'application de cette méthode à la mesure du grossissement des microscopes exige quelques détails. On commence par placer le double prisme sur l'oculaire, et l'on dispose, à la distance convenable de l'objectif, une plaque de verre sur laquelle on a tracé des lignes parallèles et également distantes, ce qu'on nomme un *micromètre objectif*. En regardant à travers le double prisme et l'instrument, on observe le nombre des divisions communes aux deux images. Supposons que leur largeur réelle estimée en millimètres soit l, l sera évidemment la longueur d'une ligne que l'instrument fait voir à la distance D de la vision distincte, sous l'angle V de déviation du double prisme; mais à l'œil nu le diamètre l d'un objet placé à la distance D serait vu sous un angle dont la tangente serait $l : D$, ainsi le grossissement sera égal à D tang V : l.

§ 7. *Polarisation.*

1464. Jusqu'ici nous avons vu les rayons de lumière conserver les mêmes propriétés autour de l'axe du faisceau : ainsi, quand on présente une surface plane obliquement à un rayon de lumière, et qu'on fait tourner la plaque autour de l'axe du faisceau, de manière qu'elle reste toujours également inclinée sur lui, la quantité de lumière réfléchie reste constante, et il en est de même de la lumière réfractée. Mais, dans certaines circonstances, les rayons de lumière

acquièrent la singulière propriété de cesser d'être également réfléchis, sous un même angle d'incidence, par un même corps, suivant le côté de leur axe qui se trouve dans le plan d'incidence; il arrive même alors que, pour certaines incidences, les rayons perdent complétement la propriété d'être réfléchis; et, quand ils traversent perpendiculairement des cristaux jouissant de la double réfraction, dans certaines positions, ils cessent de donner deux images.

La lumière acquiert cette propriété par la réflexion, la réfraction, et par la double réfraction à travers tous les corps qui donnent deux images.

Malus, à qui l'on doit la découverte de cette singulière propriété de la lumière, l'a désignée sous le nom de *polarisation*, d'après une hypothèse que Newton avait imaginée pour expliquer la double réfraction. Ce grand géomètre supposait que les molécules lumineuses avaient deux sortes de pôles, ou plutôt de faces jouissant de propriétés physiques différentes; que, dans la lumière ordinaire, les faces de même espèce des diverses molécules étaient tournées dans toutes sortes de sens; mais que, par l'action du cristal, les unes se disposaient parallèlement à la section principale, les autres perpendiculairement, et que le genre de réfraction que les molécules éprouvaient tenait au sens dans lequel leurs faces étaient tournées relativement à cette même section.

1465. *Polarisation par réflexion à la première surface des corps.* Soit AB (fig. 369) un tuyau de cuivre mobile autour de la charnière X, et garni, à chaque extrémité, d'un tambour mobile terminé par deux tiges parallèles à l'axe du tuyau, supportant l'axe de rotation d'un petit miroir plan en verre noir. Les deux petits miroirs x et x' peuvent prendre toutes les inclinaisons possibles par rapport à l'axe du tuyau, et ces inclinaisons sont mesurées par des quarts de cercle divisés; les axes de rotation des miroirs peuvent aussi prendre entre eux toutes les positions possibles, à l'aide des deux tambours mobiles qui les supportent, et ces angles sont mesurés par les cercles divisés mn, $m'n'$, que parcourent des nonius fixés aux tambours. Le tuyau AB est garni intérieurement de deux diaphragmes qui ne laissent passer que les rayons parallèles à l'axe. Inclinons les miroirs de manière que leur direction fasse un angle de 35° 25′ avec l'axe du tuyau AB, et ce tuyau, de manière qu'on puisse apercevoir, par réflexion sur le miroir x, la lumière du ciel d'abord réfléchie sur le premier. Quand les deux miroirs x et x' sont parallèles, les deux plans d'incidence coïncident,

et l'on aperçoit une image brillante; mais si, sans changer l'inclinaison des miroirs sur l'axe du tuyau, on fait tourner le tambour A de manière à faire varier la position du second plan de réflexion, on voit l'intensité de l'image décroître progressivement, et disparaître quand les deux plans de réflexion sont rectangulaires; au delà, l'image reparaît et son intensité croît jusqu'à ce que les deux plans de réflexion coïncident de nouveau. En continuant le mouvement, l'intensité de la lumière décroît, et disparaît encore quand les plans de réflexion sont rectangulaires; enfin, dans le dernier cadran, les variations sont les mêmes que dans le deuxième.

Ainsi, un rayon réfléchi sur du verre, sous une inclinaison de 35° 25′, a perdu la propriété de se réfléchir sous la même incidence, quand le second plan d'incidence est perpendiculaire au premier.

Malus avait admis que l'intensité de la lumière réfléchie sur le second miroir était représentée par $O\cos^2 i$, O étant l'intensité du rayon réfléchi quand les deux plans de réflexion coïncident, et i l'angle de ces deux plans. Depuis, cette loi a été constatée par M. Arago; mais les détails des expériences n'ont point été publiés, du moins assez complétement, pour en donner une idée bien nette.

Si dans l'expérience précédente, sans changer l'inclinaison du premier miroir, on change un peu celle du second, les intensités des images se succèdent de la même manière, quand on fait varier l'angle des deux plans de réflexion; mais l'image ne disparaît jamais complétement, l'intensité de la lumière est seulement à son minimum quand les plans sont rectangulaires. La même chose aurait lieu si, sans changer la position du miroir x', on changeait un peu celle de l'autre, ou à la fois celle des deux miroirs.

Les effets qu'on obtient successivement en faisant tourner le second miroir peuvent s'obtenir simultanément au moyen d'une disposition très-ingénieuse, imaginée par M. Guerard. Le faisceau réfléchi par le premier miroir est reçu sur un carton blanc qui porte un cône droit en verre noir, d'un angle au sommet égal à 70°, et dont l'axe coïncide avec celui du tuyau; les rayons qui arrivent sur le cône se réfléchissent tous sous un angle de 35°, et, par conséquent, on voit sur le carton deux secteurs noirs, perpendiculaires au plan de réflexion du premier miroir, deux secteurs blancs perpendiculaires aux premiers, et dans l'intervalle, des secteurs dont la lumière se dégrade d'une manière continue.

Lorsqu'un rayon de lumière a été réfléchi sur le verre sous l'incidence de 35° 25′, on dit qu'il est polarisé dans le plan d'incidence.

1466. Les corps opaques qui ne sont pas trop réfringents, tels que le marbre, les vernis noirs, l'obsidienne, etc., polarisent complétement la lumière sous une certaine incidence; d'autres parfaitement diaphanes ou seulement translucides, mais qui ont un grand pouvoir réfringent, ne la polarisent jamais complétement, tels sont le diamant, le verre d'antimoine; mais, de tous les corps, ce sont les métaux qui polarisent le moins la lumière.

D'après M. Brewster, les corps ne polarisent complétement la lumière qu'autant que l'indice de réfraction est au-dessous de 1,7.

1467. Lorsqu'un rayon a été complétement polarisé, la modification qu'il a éprouvée est toujours la même, car ce rayon a perdu la propriété de se réfléchir sur tous les corps qui polarisent complétement la lumière, lorsque l'angle d'incidence est égal à celui sous lequel ces substances polarisent la lumière, et que le plan de réflexion est perpendiculaire au plan de polarisation : ainsi, par exemple, la topaze polarise la lumière sous une incidence de 31°, l'eau sous une incidence de 37°, et un rayon polarisé par réflexion sur une quelconque de ces substances ne se réfléchirait pas sous une incidence de 35° 25′ sur le verre, de 37° sur l'eau, ou de 31° sur la topaze, si le plan de réflexion était perpendiculaire au plan primitif de réflexion ou au plan de polarisation.

Il résulte de là que, pour reconnaître si un rayon de lumière est polarisé en totalité ou en partie, et pour déterminer la direction du plan de polarisation, il suffit de le faire réfléchir sur la surface du verre sous un angle de 35° 25′ à compter de la surface, et de faire tourner le plan d'incidence : si, dans une certaine position de ce plan, la réflexion est nulle, le rayon était complétement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence; si la lumière ne disparaît pas complétement, s'il y a seulement un minimum de lumière, le rayon était partiellement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence correspondant au minimum; enfin, s'il n'y a pas de variation d'intensité, le rayon était naturel.

1468. Lorsqu'un rayon a été polarisé dans un certain sens, il conserve sa polarisation dans le même sens quand il traverse perpendiculairement un milieu diaphane d'une épaisseur quelconque, pourvu que ce milieu ne jouisse pas de la double réfraction.

1469. Quand un rayon polarisé se réfléchit sur un corps, sous

une incidence égale à celle sous laquelle le corps polarise complétement la lumière, le rayon réfléchi est entièrement polarisé dans le plan de réflexion, quelle que soit d'ailleurs la direction du plan primitif de polarisation; mais la quantité de lumière réfléchie varie suivant l'inclinaison du premier plan de polarisation sur le second. Pour toute autre incidence du rayon sur le second miroir, le rayon réfléchi est seulement polarisé en partie dans le second plan de réflexion. Or, comme la réflexion cesse quand ces deux plans sont rectangulaires et que les angles d'incidence sont ceux qui correspondent à la polarisation complète, il en résulte qu'*un rayon complétement polarisé ne peut pas donner, par réflexion, de lumière polarisée dans un plan perpendiculaire.*

1470. Pour observer les angles sous lesquels les différentes substances polarisent la lumière, on pourrait se servir de l'appareil fig. 869 : on laisserait le miroir en verre x incliné sur l'axe de 35° 25′, et à la place du miroir x' on mettrait une plaque polie du corps que l'on veut observer; on placerait les tambours de manière que les deux plans de réflexion fussent à angle droit, et l'on ferait varier l'angle de la surface de la plaque avec l'axe du tuyau jusqu'à ce que l'image réfléchie par le miroir x disparût : l'angle de réflexion serait mesuré sur le quart de cercle ab. On emploie ordinairement un autre moyen qui est fondé sur une propriété très-remarquable dont jouissent les cristaux à double réfraction. Lorsqu'on reçoit à travers un cristal un rayon de lumière à l'état naturel, on aperçoit deux images; mais, quand le rayon qui pénètre le cristal est déjà polarisé, et qu'il le traverse perpendiculairement, on n'en aperçoit qu'une seule, quand la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation; c'est l'image ordinaire dans le premier cas et l'image extraordinaire dans le second. Ainsi, pour reconnaître si un rayon de lumière est polarisé, il faut le recevoir perpendiculairement sur un cristal de spath d'Islande, auquel on donne un mouvement de rotation, et observer s'il y a deux positions pour lesquelles on n'aperçoive qu'une seule image; dans ce cas, le rayon était polarisé. Si aucune des deux images ne disparaissait, et, s'il y avait seulement un minimum d'intensité, le rayon serait seulement en partie polarisé.

Pour observer l'angle de polarisation des liquides, M. Biot emploie l'appareil suivant :

AB et AC (fig. 870) sont deux tiges de fer divisées, l'une verticale, l'autre horizontale. La première peut se transporter horizon-

talement, et son pied est garni d'un vernier; elle porte un disque circulaire mobile V, percé à son centre d'un orifice qui laisse passer les rayons de la flamme d'une bougie placée derrière. La tringle AC est garnie d'un support mobile S, sur lequel on fixe, avec de la cire molle, un petit vase renfermant le liquide que l'on veut observer; la largeur de ce vase doit être assez grande pour que la surface du liquide soit sensiblement plane au centre. Lorsque le vase est placé, on le promène sur la ligne AC jusqu'à ce que le rayon réfléchi soit complétement polarisé : alors, au moyen des divisions correspondantes à l'orifice et au support du vase, et de la hauteur du vase, on obtient facilement l'angle de réflexion. L'appareil de M. Soleil et de M. Silbermann (fig. 1020) serait d'un usage beaucoup plus commode.

Le tableau suivant renferme les angles de polarisation de quelques substances.

NOMS des SUBSTANCES.	ANGLES DE POLARISATION observés par M. BIOT.	ANGLES DE POLARISATION observés par M. ARAGO.	MOYENNES.	OBSERVATIONS.
Eau.....	36° 55′ 30″	37° 00′	36° 58′	Complète.
Huile de poison rectifiée.....	34 29 40	34 30	34 30	*Id.*
Ambre.....	33 25	.....	33 25	*Id.*
Baryte sulfatée.	32 12 30	32	32 6	*Id.*
Topaze.....	.....	31	31	*Id.*
Soufre natif....	30 7	29 25	29 46	Incomplète.
Diamant.....	23	22 47	22 54	*Id.*

1471. *Loi de M. Brewster.* M. Brewster a découvert une relation très-importante entre l'angle de polarisation et l'indice de réfraction, relation qui permet de trouver le premier lorsque le dernier est connu. La loi dont il est question consiste en ce que, sous l'incidence correspondante à la polarisation complète, le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté : d'après cela, en partant de la relation $\sin i = n \sin r$, et en désignant par θ l'angle de polarisation à compter de la normale, on aura (fig. 871)

$$i = \theta, \quad r = 90 - i,$$

et, par suite, $\sin\theta = n \cos\theta$;

et, par conséquent, $\tang\theta = n$;

ou, en comptant l'angle à partir de la surface, $\tang\theta = 1 : n$.

D'après cette loi, l'angle de 35° 25′, donné par Malus pour l'angle de polarisation du verre ordinaire, est un peu trop grand; il serait à peu près de 33° 15′; et de 33° 26′ et de 33° 5′ pour les rayons rouges et les rayons violets.

Cette loi paraît s'appliquer également au cas où la lumière se réfléchit à la surface de contact de deux milieux; mais alors, en désignant par n l'indice du premier milieu, celui dans lequel la lumière est réfléchie, et par n' celui du second, on a $\tang\theta = n : n'$.

La loi de Brewster n'est point applicable quand la réflexion a lieu à la surface de cristaux qui possèdent la double réfraction : il y a probablement pour ces corps une loi correspondante; mais elle n'est pas connue.

1472. L'indice de réfraction étant variable avec la teinte des rayons de lumière, l'angle de polarisation est réellement différent pour les rayons qui composent la lumière blanche. A la vérité ces différences sont très-petites; mais elles sont cependant suffisantes pour empêcher la disparition complète de la lumière polarisée sur une glace, lorsque les deux plans de réflexion sont perpendiculaires : l'image est formée de lumière blanche, dans laquelle manquent les rayons qui ont été complétement polarisés. La coloration de cette image est très-sensible lorsque la lame polarisante possède un grand pouvoir dispersif, comme l'huile de cassia, le diamant et le chromate de plomb.

1473. *Polarisation par des réflexions successives.* Si l'on dispose parallèlement deux lames planes comme l'indique la fig. 872, on pourra recevoir la lumière après qu'elle aura éprouvé un nombre quelconque de réflexions : on trouve ainsi que, si les plaques sont de nature à polariser complétement la lumière, quand elle se présente sous une certaine incidence, sous toute autre incidence, et après un nombre de réflexions d'autant plus grand que l'incidence diffère davantage de celle qui correspond à la polarisation complète, le rayon réfléchi est complétement polarisé. Par des réflexions successives, suffisamment multipliées, on parvient aussi à polariser complétement la lumière à la surface des métaux : d'après M. Brewster, huit reflexions polarisent complétement la lumière d'une bougie sur des plaques d'acier; il en faut trente-six pour

produire le même effet sur des plaques d'argent : le plan de polarisation est celui des plans de réflexion.

1474. *Polarisation par réflexion à la seconde surface des corps transparents.* Malus, à qui l'on doit encore ce fait remarquable, l'a constaté de la manière suivante. Il fit tailler une plaque de verre ordinaire en prisme ayant pour base un trapèze AA'BB' (fig. 873), dont l'angle B' était tel, qu'un rayon réfracté provenant d'un rayon incident sur la première surface sous l'angle correspondant à la polarisation complète, après s'être réfléchi sur la seconde surface A'B', rencontrait perpendiculairement la face BB' : le rayon émergent conservait alors le plan de polarisation qu'il possédait après la réflexion. En recevant le rayon sur une plaque de verre, on reconnut qu'il était complétement polarisé dans le plan de réflexion. Malus fit aussi cette vérification par un procédé plus direct : il reçut le rayon émergent sur un prisme de verre CDE, dont les angles en C et en E étaient tels, que le rayon transmis perpendiculairement à la face CD, après s'être réfléchi sur la face CE, sous l'angle de polarisation, sortit perpendiculairement à la face DE; lorsque le second plan de réflexion était perpendiculaire au premier, la lumière était complétement éteinte.

Le rayon incident correspondant à la polarisation complète par réflexion, et prolongé par réfraction, rencontrant la seconde surface, supposée parallèle à la première, aussi sous l'angle de polarisation, ce dernier angle peut facilement se déduire de l'angle d'incidence : en effet on a (fig. 875) $\cos\theta = n \cos\theta'$; et d'après la loi de Brewster, les angles θ et θ' sont complémentaires.

1475. *Polarisation par réfraction.* Supposons qu'un prisme de verre ABC (fig. 874) soit taillé de manière qu'un rayon incident SI dans la direction de la polarisation complète sorte perpendiculairement à la face AC : la polarisation du rayon réfracté ne sera pas changée. Or, si l'on analyse le rayon émergent, on trouve qu'il est polarisé, mais en partie seulement, et dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence. Si la lumière sortait du verre par une face parallèle à la face d'incidence, on trouverait que le faisceau émergent serait aussi polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence. Si l'angle d'incidence différait de l'angle de polarisation complète, le sens de la polarisation partielle du rayon émergent serait encore le même.

M. Arago a constaté, par des expériences que nous rapporterons plus tard, que le rayon transmis à travers une plaque à face pa-

rallèle renfermait autant de lumière polarisée que le rayon réfléchi. D'après M. Brewster, cette loi s'appliquerait seulement au rayon réfracté et non au rayon transmis.

1476. *Polarisation de la lumière par des piles de glaces.* Il résulte de ce qui précède que, si un rayon de lumière, sous l'incidence de la polarisation complète, traverse successivement des plaques transparentes parallèles AB, A'B', etc. (fig. 876), la quantité de lumière polarisée ira en croissant avec le nombre des lames, et si leur nombre est suffisant, le dernier rayon émergent sera complétement polarisé. En effet, la partie polarisée du rayon émergent *ab* ne pourra éprouver aucune réflexion à la surface supérieure de la seconde lame : car, s'il en était ainsi, comme l'angle d'incidence est de 35° 25', et que le rayon réfléchi est entièrement polarisé dans le plan d'incidence, il s'ensuivrait qu'un rayon polarisé pourrait donner de la lumière polarisée dans un plan perpendiculaire; ce que nous avons reconnu impossible. Il en sera de même à la seconde surface, car l'inclinaison du rayon réfracté sur cette surface est précisément celle qui correspond à la polarisation complète par réflexion sur la seconde face : ainsi la partie polarisée du rayon qui pénètre dans la première lame traversera la seconde et toutes les suivantes sans éprouver d'altération. Quant à la partie non polarisée du rayon, elle éprouvera une division aux premières et aux secondes surfaces : la partie réfléchie sera polarisée dans le plan d'incidence, et la partie réfractée renfermera de la lumière polarisée perpendiculairement au plan de réfraction qui s'ajoutera à la première, et traversera successivement toutes les lames sans éprouver aucune diminution. On voit, d'après cela, que la quantité de lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence croîtra avec le nombre des lames, tandis que la quantité de lumière non polarisée ira en décroissant : par conséquent, si le nombre des lames est suffisant, le rayon émergent sera complétement polarisé.

Nous venons de supposer que le rayon incident faisait avec la surface supérieure un angle de 35° 25'. Si l'angle était différent, les mêmes phénomènes se reproduiraient encore; mais on a reconnu que la quantité relative de lumière polarisée augmentait à mesure que les rayons se rapprochaient de la surface, tandis que l'intensité du rayon diminuait. La position la plus favorable pour obtenir le maximum d'intensité du rayon polarisé, c'est l'incidence de 35° 25'; mais, pour produire un rayon émergent presque complé-

tement polarisé, il faut que la pile soit traversée très-obliquement par la lumière.

1477. *Polarisation par double réfraction.* Supposons qu'un rayon de lumière, après avoir traversé perpendiculairement un rhomboïde de chaux carbonatée, soit reçu par une glace, de manière que l'angle de réflexion soit égal à 35° 25′, et que le plan de réflexion soit d'abord parallèle à la section principale du cristal, on ne verra par réflexion qu'une seule image, et ce sera l'image ordinaire; si, au contraire, le plan de réflexion est perpendiculaire à la section principale, on n'apercevra encore qu'une seule image : ce sera celle du rayon extraordinaire. Ainsi les deux faisceaux se comportent comme s'ils avaient été polarisés par le cristal, le rayon ordinaire suivant la section principale, le rayon extraordinaire perpendiculairement à cette section. Les phénomènes seraient encore les mêmes si l'on recevait les deux rayons sur une pile de glace : si le plan d'incidence des rayons est parallèle à la section principale, on n'aperçoit que l'image extraordinaire, et quand le plan d'incidence est perpendiculaire à la section principale, c'est, au contraire, l'image ordinaire qui est visible.

On peut faire l'expérience d'une manière inverse, plus facile à répéter, parce qu'elle n'exige pas que le cristal soit aussi parfait. On polarise un rayon de lumière sur le miroir x' de l'appareil fig. 869; et l'on place en avant un limbe circulaire perpendiculaire à l'axe, au centre duquel se trouve une douille renfermant un cristal de chaux carbonatée perpendiculaire à l'axe du tuyau : en regardant à travers le cristal le rayon polarisé, on n'aperçoit que l'image ordinaire quand la section principale est parallèle au plan de polarisation du rayon; mais, si l'on fait tourner le cristal d'une manière continue, l'image extraordinaire paraît, son éclat va en croissant, tandis que celle de l'autre va en diminuant; et quand la section principale est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, l'image ordinaire a disparu et l'image extraordinaire a le plus grand éclat; si l'on continue le mouvement, l'image ordinaire reparaît, son éclat augmente, tandis que l'autre diminue, et ainsi de suite.

En partant de l'hypothèse de Malus, dont nous avons parlé précédemment, et en désignant par O et E les intensités des images ordinaire et extraordinaire, par i l'angle de la section principale du rhomboïde et du plan primitif de polarisation, et par I

l'intensité de la lumière d'une des deux images quand l'autre est évanouie, on aura

$$O = I \cos^2 i, \quad \text{et } E = I \sin^2 i.$$

1478. On peut encore faire l'expérience à l'aide de deux rhomboïdes de chaux carbonatée superposés; les deux rayons qui sortent du premier étant polarisés dans le plan de la section principale et dans un plan perpendiculaire, on devra observer, dans les quatre images que l'on aperçoit à travers le deuxième rhomboïde, des variations d'intensité qu'il serait facile de prévoir d'après ce qui précède, mais que nous devons cependant décrire avec détail.

Si l'on superpose deux rhomboïdes, et que l'on observe les images d'un point extérieur, on remarque que le rayon ordinaire du premier cristal se divise en général en deux autres, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire, qui ont la même intensité quand la section principale du deuxième cristal fait avec celle du premier un angle de 45°; pour toutes les autres positions, les images ont des intensités inégales; lorsque les sections principales sont parallèles, le rayon extraordinaire s'évanouit, et quand elles sont perpendiculaires, c'est le rayon ordinaire. Le faisceau extraordinaire sorti du premier cristal présente, en traversant le second, des effets inverses : son image ordinaire devient nulle quand les sections sont parallèles; elle atteint, au contraire, son maximum quand les sections principales sont perpendiculaires : c'est alors son image extraordinaire qui disparaît. Les deux images qui disparaissent ne viennent point se confondre avec les autres; on les voit s'éteindre peu à peu à mesure que les autres augmentent d'intensité. En résumé, chaque faisceau en passant dans le second cristal se divise en deux faisceaux qui ont une égale intensité quand les sections principales font un angle de 45°, et n'éprouve qu'un seul mode de réfraction lorsque les sections principales sont parallèles ou perpendiculaires : cette nouvelle réfraction est de même nature dans le premier cas et de nature contraire dans le second.

On peut facilement vérifier ces faits en regardant un point noir tracé sur un papier blanc, à travers deux rhomboïdes dont on fait varier l'angle formé par les sections principales; mais, comme il est très-difficile de se procurer des cristaux assez épais pour que les images soient suffisamment écartées, en même temps bien transparents, et dont les surfaces soient assez polies pour qu'il y ait peu de lumière perdue par la réflexion, il est plus

avantageux d'employer deux prismes d'un très-petit angle dont une des faces soit naturelle : alors les images sont assez écartées pour que l'on puisse bien les distinguer, et, à cause de la petitesse de l'angle réfringent, les intensités des rayons sont sensiblement les mêmes que si l'on employait deux rhomboïdes ; on peut même achromatiser ces prismes à l'aide d'un prisme de verre ordinaire d'un angle convenable.

Ces modifications des quatre images se déduisent encore facilement de la loi de Malus : car, si l'on représente par l'unité l'intensité commune des rayons ordinaires et extraordinaires O et E qui sortent du premier rhomboïde, par O_o, O_e, E_o, E_e, les intensités des images qui résultent des faisceaux qui ont traversé ordinairement et extraordinairement le second rhomboïde, par i l'angle des deux sections principales des rhomboïdes, et en négligeant la perte de lumière par la réflexion et l'absorption, on aura

$$O_o = \cos^2 i, \quad E_o = \sin^2 i;$$
$$O_e = \sin^2 i, \quad E_e = \cos^2 i:$$

ainsi les quatre images se réduisent à deux quand $i = 0$ ou $90°$, et elles ont la même intensité quand $i = 45°$.

1479. Si la lumière, avant de traverser le premier rhomboïde, était déjà polarisée dans un certain plan, en désignant par i l'angle du plan primitif de polarisation et de la section principale du premier rhomboïde, et par i' l'angle de cette section principale et de celle du second rhomboïde, les intensités des deux faisceaux à leur sortie du premier rhomboïde seraient

$$O = \cos^2 i, \quad \text{et } E = \sin^2 i;$$

et chacun d'eux, en sortant du second rhomboïde, produirait deux faisceaux dont les intensités seraient représentées par les équations suivantes :

$$O_o = \cos^2 i \cos^2 i', \quad E_o = \sin^2 i \sin^2 i';$$
$$O_e = \cos^2 i \sin^2 i', \quad E_e = \sin^2 i \cos^2 i'.$$

Aux limites extrêmes les résultats de ces formules s'accordent parfaitement avec l'expérience.

1480. Ainsi, quand un rayon de lumière polarisé dans un plan quelconque traverse un cristal biréfringent, le rayon se divise en deux parties, polarisées suivant la section principale et dans un plan perpendiculaire, et les intensités de ces rayons sont les mêmes que si l'intensité de la lumière dépendait du carré d'une certaine

vitesse parallèle à la direction du plan de polarisation : car les intensités des faisceaux polarisés, parallèlement ou perpendiculairement à la section principale du cristal, ont exactement les valeurs des carrés des composantes, suivant ces directions, d'une force parallèle au plan primitif de polarisation.

1481. Il résulte de ce qui précède une conséquence très-importante : lorsque de la lumière, préalablement polarisée dans un certain plan, a été divisée en deux faisceaux égaux et parallèles, polarisés dans deux plans perpendiculaires, ce qui a lieu quand elle a traversé normalement une plaque mince cristallisée, dont la section principale fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, l'ensemble des deux faisceaux donne deux images égales en traversant une nouvelle plaque suffisamment épaisse pour qu'on puisse les observer : la lumière paraît alors complétement dépolarisée, et se comporte comme de la lumière naturelle.

1482. On a été conduit, d'après cela, à considérer la lumière ordinaire comme composée de deux faisceaux d'égale intensité, polarisée dans deux plans rectangulaires placés d'une manière quelconque : nous verrons qu'en effet cette hypothèse s'accorde parfaitement avec tous les phénomènes.

1483. Ce qui précède ne s'applique qu'aux rayons qui traversent perpendiculairement deux rhomboïdes biréfringents d'une nature quelconque. Quand les incidences sont obliques, les intensités des images éprouvent des variations analogues, mais qui dépendent des angles des rayons avec la normale, et des inclinaisons des plans d'incidence sur la section principale.

1484. *Propriété remarquable de la tourmaline.* Tous les corps absorbent une certaine portion de la lumière qui les traverse; mais certains cristaux jouissent de la singulière propriété d'absorber de préférence les rayons polarisés dans une certaine direction. La tourmaline présente cette propriété à un haut degré. Si l'on taille un prisme de tourmaline de manière que les arêtes soient parallèles à l'axe, et que l'angle réfringent soit très-petit, en observant une mire à travers les parties du prisme voisines du sommet de l'angle réfringent, on aperçoit deux images; mais, si l'on déplace l'œil en le rapprochant de la base du prisme, on voit l'image ordinaire s'affaiblir peu à peu et finir par disparaître : ainsi la tourmaline, sous une certaine épaisseur, a la propriété d'absorber les rayons polarisés dans sa section principale. L'épaisseur à laquelle l'absorption devient complète varie suivant la nature des tourmalines :

dans celles qui sont brunes, cette épaisseur est ordinairement moindre qu'un millimètre; mais les tourmalines d'une teinte bleuâtre et peu colorées ne présentent le phénomène en question, qu'autant qu'elles ont une grande épaisseur. Si l'on taille un cristal, de manière que deux faces soient perpendiculaires à l'axe, et que deux autres faces soient parallèles au même axe, quand le cristal est suffisamment épais, il est complétement opaque lorsqu'on regarde à travers les faces perpendiculaires à l'axe, et transparent quand on regarde à travers les autres. L'absorption de la lumière dans le premier cas, provient évidemment de ce que la lumière qui traverse le cristal est toujours polarisée dans un plan qui passe par l'axe. Les lames de mica de deux à trois millimètres d'épaisseur offrent la même propriété, quand le faisceau qui les traverse est incliné. Lorsque deux plaques de tourmaline parallèles à l'axe, suffisamment épaisses, sont superposées, elles ne laissent point passer de lumière quand les axes sont perpendiculaires : la raison en est évidente.

Il résulte de là, que les plaques de tourmaline peuvent être employées pour reconnaître la lumière polarisée et la direction du plan de polarisation. L'appareil se compose d'une plaque suffisamment épaisse, taillée parallèlement à l'axe, qu'on fait tourner dans son plan, et à travers laquelle on regarde : quand la lumière incidente est complétement polarisée, elle disparaît lorsque la section principale de la plaque est parallèle au plan de polarisation; dans le cas où la polarisation n'est que partielle, on n'observe que des changements d'intensité.

§ 8. *Coloration de la lumière polarisée par les lames cristallisées.*

1485. Les phénomènes que nous allons décrire sont les plus remarquables de l'optique; ils ont été découverts par M. Arago. M. Biot en a reconnu les principales lois par l'expérience; mais c'est à Fresnel qu'on en doit l'explication.

Avant d'exposer ces phénomènes, nous décrirons quelques modifications apportées à l'appareil général de polarisation [869], et une autre disposition imaginée par M. de Noremberg.

1486. Dans l'appareil de polarisation fig. 869, l'analyse de la lumière par la seconde glace est assez incommode, à cause du changement de direction des rayons réfléchis par la rotation du second plan de réflexion. On évite cet inconvénient en remplaçant le miroir par un prisme de chaux carbonatée achromatisé : les images

ont plus d'intensité; mais il est des circonstances dans lesquelles les deux images subsistent dans toutes les positions de la section principale, et ces images par leur superposition partielle deviennent moins distinctes. Il faut alors employer des analyseurs qui absorbent les rayons polarisés dans un certain plan, et qui conservent aux rayons émergents une direction sensiblement constante. Les plaques de tourmaline parallèles à l'axe satisfont à cette condition; mais leur teinte, en se mêlant à celle des images, en diminue l'éclat et en change la couleur : pour éviter ce dernier inconvénient, on emploie différentes dispositions.

La plus simple consiste en deux plaques de verre noir AB et CD, fixées parallèlement dans un disque de liége (fig. 877), de manière que la première soit rencontrée par les rayons, parallèles à l'axe du disque, sous un angle de 35° à partir de sa surface, et, par conséquent, que l'angle B soit de 55°. Il est facile de voir que les rayons arriveront à l'œil dans la direction PQ, qui ne changera pas par la rotation du système. On remplace avec avantage la seconde lame CD par un prisme de verre (fig. 878), dont les angles en *a* et *c* sont tels, que le rayon réfléchi sur le miroir AB entre perpendiculairement à la face *ab*, et sorte perpendiculairement à la face *bc*, après avoir éprouvé une réflexion totale sur la face *ac*.

1487. M. Nicol a imaginé une autre disposition qui donne beaucoup plus de lumière émergente. On coupe un rhomboïde de spath d'Islande suivant un plan passant par un des angles obtus, dirigé perpendiculairement à la section principale du cristal et à sa face supérieure, et on réunit les deux parties par du baume de Canada dans la position qu'elles avaient d'abord. Lorsqu'on regarde longitudinalement à travers le rhomboïde ainsi préparé, on ne voit qu'une seule image; lorsqu'on place deux appareils l'un devant l'autre, si leurs sections principales coïncident, on lit facilement à travers un livre imprimé; mais, si leurs sections principales sont à angle droit, il y a obscurité complète. Cet appareil est bien préférable aux tourmalines, à cause de la blancheur parfaite de la lumière transmise, que la teinte des tourmalines altère toujours.

L'explication du fait singulier, que présente un rhomboïde de chaux carbonatée disposé comme nous venons de l'indiquer, résulte de ce que l'indice de réfraction du baume de Canada 1,549 est compris entre les indices 1,654 et 1,483 des rayons ordinaires et extraordinaires, et de ce que les rayons se présentent sur la couche de baume sous un angle très-grand. En effet, quand un rayon

d'un corps pour passer dans un milieu moins réfrin-
one limite de l'angle d'incidence au delà de laquelle l'é-
, est impossible; alors la réflexion devient totale : c'est ce
ù pour le rayon extraordinaire. Le sinus de l'angle limite
gal à 1,483 : 1,549 = 0,9575; il correspond à un angle de
14'. La réflexion totale n'ayant jamais lieu pour le rayon ordi-
aire, ce rayon sera seul transmis, quand l'angle de la face de jonction des deux prismes fera, avec l'axe du prisme total, direction des rayons incidents, un angle plus petit que 90° — 74 = 16°.

1488. M. de Noremberg a imaginé un appareil de polarisation beaucoup plus commode que celui que nous avons employé jusqu'ici. Cet appareil, dont les fig. 879 et 880 présentent deux projections, se compose de deux montants AB et CD fixés sur un socle de bois; entre eux et à la partie inférieure se trouve une glace plane étamée horizontale EF, et, à une certaine hauteur, une glace nue à faces parallèles GH, montée dans un cadre, mobile autour de deux tourillons, qui pénètrent à frottement dur dans les deux montants; au-dessus de cette glace se trouve un cadre circulaire qui renferme un anneau concentrique libre, portant un cadre circulaire mobile autour d'un axe horizontal, garni d'une glace nue *mn* à faces parallèles. Enfin, la partie supérieure formée d'une plaque fixe LM munie d'un cercle divisé et percée d'un orifice circulaire, reçoit une douille garnie ou d'une plaque de verre noir inclinée, ou d'un des appareils d'analyse dont nous avons parlé; l'analyseur peut tourner librement dans la douille, et cette dernière porte un vernier qui parcourt les divisions du cercle tracé sur la plaque LM. Les rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la glace GH, de haut en bas, reviennent dans la direction opposée, par la réflexion de la glace étamée EF, traversent les glaces GH et IK, et arrivent en N à l'analyseur. Un écran S, ayant la forme d'un demi-cylindre, empêche la lumière directe d'éclairer les objets placés sur la plaque IK. La lentille T sert dans quelques circonstances à rendre la lumière convergente.

1489. Il est facile de voir qu'au moyen de l'appareil fig. 869, en plaçant entre les deux miroirs une lame de verre à faces parallèles, susceptible de tourner sur elle-même, et autour d'un axe perpendiculaire à celui du tube, et en fixant sur la lame de verre des plaques cristallisées, on pourra diriger leur section principale d'une manière quelconque par rapport au plan primitif de polarisa-

tion, et faire varier à volonté la direction de leurs faces sur celle du rayon polarisé. Si la nouvelle pièce mobile est garnie de deux cercles divisés, on pourra déterminer l'angle de leur section principale avec le plan primitif de polarisation, et leur inclinaison sur la direction des rayons de lumière. Toutes ces expériences se font également avec une grande facilité au moyen de l'appareil de M. de Noremberg, en fixant la plaque sur la glace *mn*.

1490. *Coloration de la lumière polarisée en traversant les lames minces cristallisées.* Lorsqu'on emploie l'appareil des deux miroirs (fig. 869), et que les deux plans de réflexion sont rectangulaires, nous savons que toute la lumière est absorbée; il en est de même quand on place l'une derrière l'autre deux plaques de tourmaline dont les sections principales sont à angle droit. Mais si l'on introduit entre les deux miroirs ou entre les deux tourmalines une lame cristallisée, la lumière reparaît quand sa section principale n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation, parce que la lumière qui sort de la lame cristallisée est composée de deux faisceaux polarisés, l'un dans sa section principale, l'autre dans un plan perpendiculaire. Mais si la lame cristallisée est suffisamment mince, elle se trouve colorée d'une teinte qui dépend de sa nature, de son épaisseur, des positions relatives de la section principale de la lame et des deux plans de réflexion dans le premier cas, ou des sections principales des deux tourmalines dans le second. Des phénomènes semblables apparaissent lorsque la lumière, après avoir traversé la lame mince, est reçue par un prisme épais biréfringent; mais on aperçoit à la fois deux images. Nous décrirons avec détail ces derniers phénomènes, attendu que les premiers s'en déduisent facilement.

1491. Considérons un rayon de lumière blanche complétement polarisée, traversant perpendiculairement une lame cristallisée d'une épaisseur convenable, et que nous supposerons d'abord à un seul axe. Supposons que la lumière, avant d'arriver à l'œil, traverse un prisme biréfringent, que la lame mince et le prisme puissent tourner sur eux-mêmes autour de l'axe du faisceau, de manière que les sections principales de la lame mince et du prisme puissent prendre toutes les inclinaisons possibles sur le plan primitif de polarisation, et que i et s représentent les angles de ces sections principales et du plan primitif.

Si i est égal à 0° ou à 90°, les deux images sont blanches, quel que soit s, et l'une d'elles disparaît pour $s = 0$, ou $s = 90°$.

Si i est quelconque, en donnant à s successivement toutes les valeurs comprises entre 0° et 360°, on obtient les résultats suivants : 1° aucune des deux images ne disparaît; 2° les deux images sont blanches lorsque $s = i$, ou $s = i + 90°$, c'est-à-dire quand la section principale du prisme est parallèle ou perpendiculaire à celle de la lame mince; mais ces deux images ont des intensités d'autant plus inégales que l'angle i diffère davantage de 45° ou de 135°; 3° pour toutes les valeurs intermédiaires de s, les deux images sont toujours colorées, et les teintes sont complémentaires : car, lorsqu'elles se superposent en partie, la partie commune est blanche; 4° les intensités des deux images colorées varient avec s, mais sans changer de nature; le maximum d'intensité a lieu, pour une même valeur de i, quand $s = i + 45°$, ou $s = i + 135°$, c'est-à-dire précisément aux milieux des intervalles angulaires qui correspondent aux images blanches; 5° pour la même lame, la nature des teintes est aussi indépendante de i, mais elles ont le plus grand éclat possible quand $i = 45°$; 6° quand les images passent par le blanc, elles échangent leurs teintes.

Si la section principale du rhomboïde fait un angle constant de 0° ou de 90° avec le plan primitif de polarisation, et si l'on fait varier l'angle i, pour $i = 0$, $i = 90°$, $i = 270°$, une des deux images est blanche, et l'autre disparaît; le maximum d'éclat des deux images complémentaires a lieu pour $i = 45°$, ou $i = 135°$; mais pour toutes les valeurs de i, chaque image conserve invariablement la même teinte.

Lorsque le faisceau qui a traversé la plaque est reçu sur une glace inclinée, de manière à le polariser complétement, ou à travers une pile de glaces convenablement inclinée, ou à travers une tourmaline, ou à travers un prisme de Nicol, les phénomènes sont les mêmes; seulement on n'aperçoit qu'une seule image.

1492. Lorsque la plaque, restant toujours perpendiculaire au faisceau, varie d'épaisseur, les teintes changent suivant les mêmes lois que dans les anneaux colorés par les variations d'épaisseur de la lame mince (M. Biot). Un prisme de chaux sulfatée donne toutes les teintes des anneaux, mais distribuées en bandes parallèles. En collant une lame de sulfate de chaux de 2 millimètres d'épaisseur sur une lame de verre, et y formant une cavité au moyen du tour avec de l'émeri fin, de manière que l'épaisseur au fond soit très-petite, on obtient des anneaux colorés semblables à ceux qu'on produit par la superposition de deux lentilles. En traçant avec une

pointe des lignes sur des plaques minces de sulfate de chaux, les traits prennent des nuances différentes de celles des plaques, et qui varient avec leur profondeur.

Quand la lame cristallisée est inclinée sur la direction du faisceau, les teintes changent par l'accroissement d'inclinaison, et il se produit l'effet qui résulterait tantôt d'une augmentation, tantôt d'une diminution d'épaisseur.

1493. Les lames minces, pour produire les phénomènes dont il est question, peuvent être à un ou à deux axes; mais pour les cristaux à un axe, à quelques exceptions près, dont nous parlerons bientôt, l'axe ne doit pas être perpendiculaire aux faces des lames; et pour les cristaux à deux axes, aucun ne doit être dans le même cas, attendu qu'en général il n'y a pas de double réfraction dans le sens des axes. Pour les cristaux à deux axes, les plans normaux qui passent par les lignes moyennes, c'est-à-dire celles qui divisent les angles des axes en deux parties égales, se comportent comme la section principale des cristaux à un axe et la section perpendiculaire, du moins quand une de ces lignes est parallèle aux faces de la lame. Dans tous les cas, les lames doivent avoir des épaisseurs comprises dans certaines limites. Le mica et la chaux sulfatée, par la facilité avec laquelle on les divise en lames minces, sont d'un usage très-commode. Pour la chaux sulfatée, les limites sont $1^{mm},269$ et $0,423$. Cette dernière substance se divise naturellement en parallélogrammes; lorsque les côtés *ab* et *bc* (fig. 880 A) sont dans le rapport de 13 à 36, la grande diagonale *bd* coïncide avec la ligne moyenne, et les deux axes *be* et *bf* forment avec la ligne moyenne un angle de 30°. Les lames de chaux sulfatée et de cristal de roche parallèles à l'axe, de même épaisseur, donnent exactement les mêmes teintes. Quant au mica de Sibérie, le plan des axes est perpendiculaire aux lames. D'après M. Biot, les épaisseurs de mica et de chaux sulfatée qui donnent les mêmes teintes sont entre elles comme 696 : 365. Ces phénomènes ne pourraient pas être observés facilement avec des cristaux de carbonate de chaux, parce que les lames de cette substance devraient être trop minces. M. Biot a trouvé qu'une lame de chaux carbonatée, devrait être 18 fois plus mince qu'une lame de chaux sulfatée pour donner la même teinte.

1494. En superposant des plaques différentes et faisant varier leurs positions, il se produit des phénomènes qui souvent sont très-compliqués, que nous ne pouvons pas même énoncer, mais que la

théorie permet de prévoir et de calculer, comme nous le verrons bientôt.

Nous dirons seulement que, quand on superpose deux plaques de même nature ayant des épaisseurs e et e', de manière que les sections principales soient parallèles ou perpendiculaires, on obtient l'effet qui résulterait d'une seule plaque de la même substance ayant une épaisseur égale à $e + e'$, ou à $e - e'$.

Il est important de remarquer que, quand on se sert de l'appareil de M. de Noremberg, et qu'on met la plaque mince sur la glace étamée EF, la lumière polarisée la traverse deux fois, avant et après la réflexion sur la seconde surface de la glace, et, par conséquent, on obtient les mêmes apparences que si la lame avait une épaisseur double et n'était traversée qu'une seule fois par la lumière.

1495. *Coloration de la lumière par des plaques épaisses cristallisées.* Nous avons dit qu'une plaque unique ne produisait pas de coloration quand son épaisseur excédait une certaine limite; mais si l'on prend deux plaques épaisses de la même substance et d'épaisseurs différentes, et si on les superpose de manière que les sections principales soient à angle droit, on obtient la même coloration qu'avec une plaque mince dont l'épaisseur serait la différence des épaisseurs des plaques superposées. On produit aussi des teintes colorées avec des plaques épaisses de différentes substances croisées ou parallèles.

1496. *Anneaux colorés produits par les lames minces cristallisées traversées par un faisceau convergent de lumière polarisée.* Supposons qu'un faisceau de lumière blanche, convergente et polarisée, traverse perpendiculairement une plaque de chaux carbonatée taillée perpendiculairement à l'axe, et dont l'épaisseur soit de quatre à vingt millimètres : si l'on observe le rayon émergent avec une plaque de tourmaline ou un prisme de Nicol, on aperçoit une série d'anneaux colorés concentriques. Lorsque la section principale de l'analyseur est parallèle au plan primitif de polarisation, la série des anneaux est coupée par une grande croix noire, dont une des branches est parallèle à ce plan. Quand au contraire la section principale de l'analyseur est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, la croix noire est remplacée par une croix blanche, et chaque point de la nouvelle image offre une couleur complémentaire de celle qu'il avait dans la première position (fig. 881 et 882). Avec une lumière homogène, les anneaux et les croix sont noires et de

la couleur de la lumière; les anneaux de même ordre de différentes teintes ont des diamètres qui augmentent avec la réfrangibilité des rayons, et qui, par conséquent, croissent du rouge au violet. C'est la superposition partielle des anneaux de différentes teintes qui produit les anneaux irisés qui se manifestent dans la lumière blanche. Les diamètres des anneaux augmentent à mesure que l'épaisseur de la plaque devient plus petite. Les mêmes phénomènes se manifestent avec des plaques minces de toutes les substances à un axe; mais les plaques de cristal de roche présentent des circonstances particulières dont il sera question en parlant de la polarisation circulaire.

1497. Pour observer ces phénomènes, on peut employer une grande plaque de verre noir, ou de verre ordinaire noircie à la surface inférieure, sur laquelle on fait réfléchir la lumière des nues; on place sous une incidence moyenne de 35° 25′ un tuyau court, dans lequel se trouve la lame perpendiculaire à l'axe, et à l'extrémité une douille mobile portant la plaque de tourmaline, ou une seconde glace, ou une pile de glace, ou un prisme biréfringent achromatique, ou l'un des analyseurs dont nous avons parlé [1486]. On ne pourrait pas se servir de l'appareil général de polarisation fig. 869, parce que le faisceau de lumière ne serait pas assez convergent. On emploie aussi une disposition beaucoup plus commode imaginée par M. Herschel. Cet appareil (fig. 883) se compose de deux tuyaux en cuivre AB, A′B′, qui peuvent facilement tourner l'un dans l'autre; le tuyau intérieur porte une plaque de tourmaline T, destinée à polariser le faisceau incident perpendiculairement à sa section principale, et en avant une lentille ZZ′, dont le foyer tombe sensiblement sur la plaque T; le tube enveloppant porte la plaque perpendiculaire à l'axe PP′ et une seconde tourmaline T′; la plaque PP′ peut tourner dans son plan à l'aide d'une petite tige et d'une échancrure pratiquée dans le tuyau AB. On place l'œil en T′, et l'on dirige l'appareil vers le ciel. La lentille est destinée à rendre la lumière plus convergente, et à égaliser l'éclat du champ éclairé par une lumière naturelle ou artificielle. On emploie ordinairement un appareil plus simple, composé de deux disques de cuivre renfermant les plaques de tourmaline, qui peuvent tourner dans deux anneaux en fil de cuivre formés par un même fil (fig. 884), et que l'élasticité du métal maintient appliqués; on interpose entre les tourmalines des disques de liége renfermant les plaques cristallisées. Il est important de faire ces

expériences à la lampe monochromatique : on aperçoit des courbes jaunes et noires qui couvrent tout le champ, et qui sont incomparablement plus nettes que les bandes irisées dans la lumière blanche; mais il est alors indispensable de mettre en avant de la première tourmaline une glace dépolie ou une lentille, afin d'étaler la lumière de la flamme dans toute l'étendue du champ. En employant la lumière blanche et des verres colorés, les bandes ne sont pas si nettes, parce que les verres absorbent trop de lumière, et que toutes les teintes ont moins d'éclat que la lumière jaune.

1498. Tous les cristaux à un axe ne produisent pas nettement et régulièrement les apparences dont nous venons de parler. Quelquefois les anneaux sont ovales et les croix sont contournées; on doit attribuer ces anomalies à des défauts de cristallisation. Mais on a remarqué fréquemment dans les cristaux d'apophyllite du Tyrol un phénomène singulier dont on ne connaît point la cause ; les anneaux n'ont presque d'autres teintes que le jaune-verdâtre et le violet-rougeâtre; et il ne se forme point d'anneaux dans la lumière jaune. Ce cristal est négatif pour une des extrémités du spectre, et positif pour l'autre.

1499. Lorsqu'un cristal à deux axes est taillé parallèlement ou perpendiculairement à la ligne moyenne, en opérant comme pour les cristaux à un axe, on aperçoit deux systèmes d'anneaux elliptiques, et une croix blanche ou noire (fig. 885). Si l'on fait tourner la plaque mince autour de l'axe du faisceau, sans changer le plan de polarisation primitif et la direction de la section principale de la tourmaline, les croix se déforment. Les fig. 886, 887 et 888 représentent les apparences de la plaque lorsque la rotation commence, et lorsqu'elle est de 1/4 et de 1/2 d'angle droit. Les mêmes phénomènes se produisent dans les quatre cadrans. Quand les axes forment entre eux un angle considérable, on ne peut pas apercevoir à la fois les deux systèmes d'anneaux; mais ils sont disposés comme dans les cristaux où les axes sont assez rapprochés pour que les deux systèmes d'anneaux puissent être observés simultanément.

Ces phénomènes peuvent être facilement observés dans les cristaux de nitre et d'aragonite : les axes sont peu inclinés, et l'on aperçoit à la fois les deux systèmes d'anneaux. Les cristaux de nitre ont ordinairement la forme d'un prisme à six pans; l'axe moyen étant parallèle à l'axe de figure du prisme, les plaques devront être taillées perpendiculairement à cet axe; l'angle des axes est d'environ 6°. Dans le mica et la topaze les faces de clivage sont

perpendiculaires à l'axe moyen; comme les axes font un angle assez considérable, on ne peut apercevoir les anneaux que successivement en inclinant les plaques.

1300. Lorsque la plaque est éclairée successivement avec des faisceaux de lumière homogène, M. Herschel a observé que les centres des deux systèmes d'anneaux n'occupent pas rigoureusement la même place : ainsi l'on doit considérer les cristaux à deux axes comme renfermant deux systèmes d'axes, et chaque couple comme correspondant à chaque espèce de rayons.

Il résulte de là que, dans les cristaux où les systèmes d'axes diffèrent sensiblement, les anneaux dans la lumière blanche sont confus, et qu'on ne peut bien reconnaître leur forme qu'en les observant avec une lumière homogène.

Dans le tartrate de potasse, l'angle des axes des rayons violets est de 56°, et celui des rouges de 76°; les axes des autres teintes sont intermédiaires. La même chose a lieu pour les cristaux de carbonate de plomb, la topaze incolore, certaines variétés de mica, le diopside, le borax. C'est le contraire pour les cristaux de nitre, de sucre et d'aragonite, c'est-à-dire que l'angle des axes croît du rouge au violet. Dans le borax, les axes de différentes teintes ne sont pas dans le même plan : les plans des axes conjugués tournent dans le même sens du rouge au violet, et les pôles des diverses teintes sont situés sur des droites parallèles.

1301. Herschel a reconnu que, dans les cristaux à deux axes taillés parallèlement ou perpendiculairement à la ligne moyenne, les courbes de même teinte, qu'il a désignées sous le nom de *lignes isochromatiques*, appartiennent à la classe des courbes connues sous le nom de *lemniscates;* dans ces courbes (fig. 889), le produit des distances d'un point quelconque aux deux foyers est égal à un nombre constant. Ces courbes n'acquièrent une grande netteté que par une lumière homogène, et surtout par celle de la flamme de l'alcool saturé de sel marin : on voit alors des lemniscates dans tout le champ de la vision, mais qui se resserrent toujours davantage, à mesure qu'elles s'étendent. Quand les axes se rapprochent, les parties des courbes qui environnent les pôles prennent des formes toujours plus voisines du cercle, et qui deviennent des cercles quand les axes se confondent. Lorsqu'au contraire l'angle des axes augmente, les courbes s'allongent, et les parties voisines du centre se rapprochent de la forme hyperbolique; et quand l'angle des axes devient égal à deux droits, c'est-à-dire quand le cristal est à un axe, pa-

rallèle à la lame, les lemniscates deviennent des hyperboles équilatères. On peut facilement observer, au moyen de la lampe monochromatique, les bandes hyperboliques dans les plaques de spath d'Islande, de tourmaline claire, de cristal de roche, etc., taillées parallèlement à l'axe.

1502. Lorsqu'on superpose des plaques à un ou deux axes, on obtient des franges colorées diversement contournées, suivant leur nature, leur épaisseur et les positions des axes; nous nous contenterons d'indiquer les phénomènes les plus remarquables qu'on a observés.

1503. Si l'on prend une lame de mica d'environ $0^{mm},4$ d'épaisseur, et qu'on la place entre deux tourmalines croisées, on aperçoit, en inclinant un peu la plaque, les deux pôles des lemniscates : les bandes irisées sont très-larges dans la lumière blanche, et les courbes un peu diffuses; mais à la lumière de l'alcool salé elles sont très-nettes. Si l'on superpose deux plaques d'égale épaisseur, de manière que les plans des axes se coupent à angle droit, on aperçoit deux systèmes de courbes et quatre pôles (fig. 890). En croisant des lames de quartz égales, parallèles à l'axe, et de 5 à 6 millimètres d'épaisseur, on obtient des franges disposées comme dans la fig. 891. AB et A'B' (fig. 892) sont deux douilles en cuivre, renfermant chacune une plaque de cristal de roche perpendiculaire à l'axe, d'environ 10 millimètres d'épaisseur. Les douilles sont mobiles séparément autour d'une charnière, et peuvent être inclinées entre elles d'une quantité quelconque; les charnières sont fixées à une tige C, qui peut tourner sur elle-même; en avant se trouve une plaque de tourmaline D, qui peut tourner dans son plan. Quand les plaques AB et A'B' sont parallèles entre elles et à la plaque D, et qu'elles sont traversées par de la lumière polarisée, on aperçoit un seul système d'anneaux colorés concentriques sans croix; si l'on incline les plaques AB et A'B', on aperçoit deux systèmes d'anneaux, d'autant plus séparés que les plaques sont plus inclinées, et entre eux, au milieu de la distance des centres, des franges transversales, contournées dans la partie voisine des anneaux, qu'elles traversent en partie. Quand l'angle des plaques excède 30°, les franges transversales sont sensiblement rectilignes, également espacées, et ne sont nettes qu'à une certaine distance des cercles, de chaque côté (fig. 893). On peut les suivre à une assez grande distance en tournant à droite ou à gauche la tige C au moyen du bouton qui y est fixé; par la rotation de la

plaque D dans son plan, les teintes des franges changent, mais leurs contours restent les mêmes. La partie centrale du système des franges transversales est une bande noire entre deux bandes blanches, ou une bande blanche entre deux bandes noires; on passe de l'un à l'autre de ces deux systèmes en faisant tourner tout l'appareil, ou seulement la plaque D, de 90°.

Si l'on prend deux plaques de cristal de roche, taillées parallèlement à l'une des faces naturelles des pyramides qui terminent le cristal, d'une épaisseur de 1 millimètre environ, et dont les faces forment entre elles un angle très-petit, mais de manière que dans l'une l'arête du prisme soit parallèle à l'axe, et que dans l'autre il soit perpendiculaire, en superposant les prismes de manière que les angles soient opposés, cette plaque, observée avec une tourmaline à la lumière réfléchie d'une glace noire, donne de magnifiques bandes colorées, parallèles aux arêtes des prismes.

1504. *Appareil de Savart.* Si l'on coupe en deux parties une plaque de cristal de roche taillée parallèlement à une des faces des pyramides qui terminent le cristal, de 1 à 2 millimètres d'épaisseur, et qu'on les superpose de manière que les arêtes qui étaient contiguës soient perpendiculaires, en observant cette plaque double à la lumière réfléchie par une glace noire, au travers d'une tourmaline, on aperçoit de très-belles bandes colorées hyperboliques, mais dont les parties centrales sont sensiblement rectilignes; et si l'on fixe la tourmaline oculaire aux deux plaques, de manière que sa section principale divise en deux parties égales l'angle formé par les sections principales des plaques, en faisant tourner le système des trois plaques, les bandes colorées tournent en même temps. Le maximum d'éclat a lieu quand les bandes sont parallèles ou perpendiculaires au plan primitif de polarisation; mais dans le premier cas la partie centrale des franges est occupée par une bande blanche comprise entre deux bandes noires, et, dans le second cas, par une bande noire comprise entre deux bandes blanches. Comme cet appareil donne des franges très-appréciables avec la plus petite quantité de lumière polarisée, il est extrêmement commode pour reconnaître à la fois la lumière polarisée et la direction du plan de polarisation. Les plaques sont collées avec de la térébenthine, et fixées dans un disque de liége. Pour reconnaître, par exemple, la polarisation de la lumière du ciel, il faut tourner l'appareil jusqu'à ce que l'on aperçoive les franges au maximum d'éclat, et que la

bande centrale soit blanche; la direction des franges sera celle du plan de polarisation de la lumière.

Lorsqu'on observe la flamme de l'alcool saturé de sel marin avec deux plaques de quartz croisées, on aperçoit dans le champ, outre les bandes jaunes et noires, des figures qui ressemblent à des alvéoles d'abeilles.

1505. *Polarisation rotative.* Quand un cristal à un seul axe de double réfraction est taillé perpendiculairement à l'axe, et qu'il est traversé perpendiculairement par un faisceau polarisé suivant une direction quelconque, le plan de polarisation reste le même après l'émergence : car le plan de polarisation primitif est toujours renfermé dans la section principale du cristal, puisque l'axe est parallèle à la direction du rayon incident. Mais M. Arago a reconnu que les plaques de cristal de roche taillées perpendiculairement à l'axe jouissent de la propriété de faire tourner le plan de polarisation du faisceau qui les traverse. Certains cristaux font tourner le plan de polarisation primitif de droite à gauche, et d'autres de gauche à droite. M. Biot a observé dans ces phénomènes les lois suivantes :

1°. Les plaques provenant d'un même cristal font tourner le plan de polarisation dans le même sens, et d'une quantité proportionnelle à leur épaisseur. On rencontre quelquefois des plaques qui, dans des points différents, ont des rotations opposées; mais ces variations proviennent toujours de ce que la plaque a été obtenue en coupant des cristaux groupés.

2°. Les plaques d'égale épaisseur, provenant de cristaux qui agissent en sens contraire, produisent des déviations à très-peu près égales, mais en sens contraire.

3°. Lorsque plusieurs plaques sont superposées, l'effet total est égal à la somme des effets produits par chacune d'elles, si elles agissent dans le même sens, ou, à la différence des sommes des effets de même nature, si toutes les plaques n'agissent pas de la même manière.

4°. Quand une même plaque reçoit successivement des faisceaux homogènes, polarisés suivant la même direction, la déviation est d'autant plus grande que le faisceau est plus réfrangible. D'après M. Biot, pour une plaque de cristal de roche de 1 millimètre d'épaisseur, les déviations du plan de polarisation sont :

Pour le rouge extrême..... 17° 29′ 47″

Pour la limite du rouge et de l'orangé....	20°	28′	47″
— de l'orangé et du jaune.....	22	18	49
— du jaune et du vert.....	25	40	31
— du vert et du bleu.....	30	2	45
— du bleu et de l'indigo.....	34	34	18
— de l'indigo et du violet.....	37	51	58
Pour le violet extrême.....	44	4	58

1506. Il résulte de là que, si l'on fait passer, à travers une plaque de cristal de roche perpendiculaire à l'axe, un faisceau de lumière blanche, que l'on reçoit ensuite à travers un analyseur, on obtient deux images colorées. L'image ordinaire résulte de la superposition de toutes les images ordinaires fournies par les différents rayons colorés, et il en est de même de l'image extraordinaire : or, comme les plans de polarisation des différents rayons ne coïncident pas, chacune des deux images n'aura pas une teinte constante; mais il est facile de voir que les teintes des deux images seront complémentaires. En employant les données précédentes et la méthode de Newton pour obtenir la teinte résultant d'un mélange quelconque de rayons, on peut déterminer la teinte des deux images : c'est ce que M. Biot a fait dans plusieurs cas particuliers, et les résultats du calcul se sont trouvés parfaitement d'accord avec l'expérience.

La fig. 1038 fera mieux comprendre comment les différentes teintes se forment. Supposons que AB soit la direction du plan primitif de polarisation, et que les lignes OR et OV représentent les directions des plans de polarisation des rayons rouges et violets après leur émergence; si la section principale de l'analyseur coïncide avec AB, les teintes du rayon rouge dans l'image ordinaire et dans l'image extraordinaire seront proportionnelles à $I \cos^2 r$ et $I \sin^2 r$; celles du rayon violet seront de même représentées par $I' \cos^2 v$ et $I' \sin^2 v$; et ainsi des autres. On voit d'après cela que les images seront complémentaires, et que les teintes composées diffèrent de celles du spectre. Si la section principale de l'analyseur avait toute autre direction, les images ordinaire et extraordinaire s'obtiendraient de la même manière.

M. Biot avait reconnu il y a longtemps, et a constaté récemment par de nouvelles expériences (*C. R.*, t. XXII), que les rotations des plans de polarisation des rayons simples sont proportionnelles aux carrés des indices de réfraction, ou en raison inverse des carrés

des longueurs des ondes dans le système des ondulations, ou des carrés des longueurs d'accès dans le système de l'émission.

1507. Les anneaux colorés produits par des plaques épaisses de cristal de roche ne présentent pas les mêmes apparences que ceux qui sont produits par les autres cristaux à un axe. Dans la lumière blanche, une large plage centrale est couverte d'une teinte uniforme qui change par la rotation de la plaque de tourmaline; au delà, on aperçoit à peine des traces des croix blanches ou noires. Lorsqu'on observe à travers un verre rouge, en faisant tourner la tourmaline dans un sens, on voit naître, du centre, des cercles alternativement noirs et rouges; par le mouvement contraire, les cercles diminuent de diamètre et disparaissent au centre. Quand, en tournant la tourmaline de gauche à droite, dans le sens de la rotation d'un tire-bouchon qu'on enfonce dans le liége, les cercles marchent du centre à la circonférence, le cristal tourne à droite; dans le cas contraire il tourne à gauche.

Lorsque les plaques ont une épaisseur comprise entre 1 et 5 millimètres, la partie centrale des anneaux n'a plus une teinte uniforme : elle est occupée, tantôt par une croix colorée, qui ne s'étend pas jusqu'aux premiers anneaux, et dont les branches sont d'autant plus courtes que le cristal est plus épais; tantôt par quatre taches colorées: il y a toujours une position de la tourmaline pour laquelle la croix est bleue. Cette teinte passe au violet quand on tourne très-peu la tourmaline dans le sens de la rotation du quartz. Lorsque les plaques sont très-minces, ce bleu est très-foncé, et le moindre mouvement le fait passer au violet sombre peu appréciable, et ensuite au jaune sale. Quand on met une plaque de quartz de 2 millimètres sur la glace EF de l'appareil (fig. 879), et au-dessus une lentille convergente, on aperçoit deux S croisées (fig. 893 A) dont les convexités sont tournées dans le sens de la rotation de la plaque (spirales de M. Airy). Si l'on superpose deux plaques égales qui tournent en sens contraires, en observant avec deux tourmalines croisées, on voit les mêmes figures; le sens des courbures est déterminé par la première plaque qui reçoit la lumière. On rencontre souvent des cristaux de quartz dans lesquels des accidents de cristallisation troublent la régularité des apparences que nous avons décrites. On trouve dans les *Mémoires de la Société de Lille*, 1834, plusieurs mémoires de M. Delezène qui contiennent beaucoup d'observations très-curieuses sur les phénomènes dont il est question.

1508. De toutes les substances solides examinées jusqu'ici, le

quartz est la seule qui présente le phénomène dont il s'agit. Mais M. Biot a découvert la même propriété dans plusieurs liquides, tels sont les huiles essentielles de citron, de térébenthine, de laurier; les dissolutions alcooliques de camphre, les dissolutions de sucre, d'acide tartrique, des tartrates. Depuis, M. Bouchardat a reconnu que les alcalis végétaux se comportaient de la même manière. Toutes les dissolutions de ces corps dans des liquides inactifs, produisent des déviations proportionnelles aux quantités de matières actives en dissolution, excepté pourtant l'acide tartrique. « Tandis que presque toutes les autres substances douées du pouvoir rotatoire impriment aux plans de polarisation des divers rayons simples des dispersions presque identiques dans leurs rapports, l'acide tartrique, observé à l'état d'isolement dans les liquides inactifs, sépare ces plans les uns des autres suivant des lois toutes différentes, lesquelles varient encore avec la nature du dissolvant; et, pour le même dissolvant, avec la proportion relative de l'acide et la température de la dissolution. Puis il perd tout à coup cette spécialité temporairement, dans les combinaisons quelque peu énergiques où on l'engage, pour les reprendre, quand on l'en a tiré ou quand on a neutralisé le corps qui agissait sur lui. » (M. Biot, *A. C. et P.*, t. IX.)

1509. Les différentes substances que nous venons d'énumérer, n'agissent pas toutes dans le même sens : l'essence de térébenthine, les dissolutions de camphre dans l'alcool et l'essence de laurier font tourner le plan de polarisation de droite à gauche; l'essence de citron, les dissolutions de sucre cristallisable, produisent une rotation de gauche à droite; celles de sucre incristallisable naturelle, et celles qu'on obtient en traitant des dissolutions de sucre cristallisable par les acides, produisent des rotations égales, mais de signe contraire.

Les actions de ces substances sont très-différentes, comme on peut en juger par le tableau suivant, dans lequel tous les corps sont supposés avoir une épaisseur de 1 millimètre et éclairés par la lumière rouge.

Cristal de roche	18°	24′	50″
Essence de térébenthine		16	16
Solution alcoolique de camphre		1	5
Essence de citron		26	10
Sirop de sucre concentré		33	14

Pour les autres rayons, les déviations se déduiraient probable-

ment de celle du rayon rouge, d'après la loi trouvée par M. Biot pour les quartz.

1510. La polarisation rotative du quartz peut être attribuée à sa structure, car le quartz fondu par la chaleur et celui qui a été combiné avec la potasse, ne jouissent point de cette propriété. Mais celle des liquides provient évidemment d'une action directe des molécules sur la lumière. La polarisation rotative est un phénomène important, et qui permet de distinguer certains corps d'autres, dont ils ne diffèrent pas sous le rapport de leur composition : tels sont, par exemple, les acides tartrique et paratartrique, qui sont isomères; le premier seul est doué de la polarisation rotative. Les limites dans lesquelles nous devons nous renfermer, ne nous permettent pas d'entrer dans plus de détails; nous renvoyons aux nombreux mémoires que M. Biot a publiés sur cet objet dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, dans les *Mémoires de l'Académie*, et dans les *Annales de Physique et de Chimie*. Mais nous croyons devoir indiquer la disposition de l'appareil employé par M. Biot, pour déterminer la rotation des liquides, attendu que les angles de rotation étant proportionnels, pour la plupart des dissolutions, aux quantités de matière dissoute et à la longueur des chemins que parcourt la lumière, ce mode d'expérience remplace une analyse chimique qui exigerait beaucoup plus de temps, et serait souvent bien moins certaine.

1511. L'appareil de M. Biot (fig. 1039) est renfermé dans une chambre obscure. En dehors de l'orifice percé dans le volet, se trouve une glace noire *a*, convenablement inclinée pour polariser complétement la lumière du ciel, et renvoyer le rayon réfléchi dans une direction constante. Sur le trajet du rayon réfléchi se trouve un tube de cuivre étamé intérieurement, ou un tube de verre fermé à chaque extrémité par des glaces minces à faces parallèles; ces tubes sont destinés à recevoir les liquides dont on veut observer la rotation. Au delà des tubes se trouve l'analyseur *b*, formé d'un prisme biréfringent achromatisé. Ce prisme est assujetti dans une douille mobile au centre d'un cercle divisé; une alidade fixée à la douille et garnie d'un vernier en détermine la position; le cercle est monté à charnière sur un pied solide, de manière à pouvoir être placé perpendiculairement à l'axe du tube. L'analyseur étant disposé de manière qu'une des deux images soit nulle quand le tube est enlevé, on le remet en place, on cherche alors, en tournant l'analyseur, une teinte d'un rouge violet, qui ne se produit

que dans une variation très-petite de l'analyseur, et que M. Biot prend pour couleur de repère. On peut aussi chercher le maximum d'intensité d'un rayon rouge que laisse passer une plaque de verre de même couleur placée devant l'œil. Nous renvoyons, pour plus de détails, à une instruction que M. Biot a publiée en 1845, sur l'usage de son appareil.

1512. M. Soleil a imaginé récemment un instrument au moyen duquel on détermine, avec une grande promptitude et une grande facilité, la richesse d'une liqueur sucrée. Dans cet appareil, on ne mesure pas directement la rotation du plan de polarisation produite par une colonne de liquide; mais on compense la rotation qu'elle produit par une épaisseur convenable de quartz, perpendiculaire à l'axe, agissant en sens contraire; cette épaisseur est proportionnelle à l'effet de la dissolution et, par conséquent, à la quantité de sucre qu'elle renferme.

L'appareil fig. 1040, monté à charnière sur un pied solide, se compose de deux tuyaux fixes, entre lesquels on place un tube de verre fermé par deux glaces parallèles, et renfermant le liquide sur lequel on veut opérer. *o* est un orifice par lequel pénètre la lumière d'une lampe qui a traversé un globe ou une plaque de verre dépoli; *a* est un prisme biréfringent achromatisé; *b* un autre prisme biréfringent également achromatique; il ne laisse apercevoir que deux images, parce que l'un des rayons polarisés par le prisme *a* est trop incliné sur l'axe de l'appareil pour arriver dans le prisme *b*; ce dernier est placé de manière à éteindre complétement une des deux images. Derrière le prisme *a* se trouve une plaque *c*, formée de deux lames de quartz perpendiculaires à l'axe, de même épaisseur, agissant en sens contraire et collées latéralement; le plan de jonction est placé dans l'axe de l'appareil et verticalement. Cette plaque laisse voir deux images circulaires complémentaires, divisées chacune par un trait vertical correspondant à la ligne de jonction des deux plaques de quartz; si l'analyseur *b* était un peu dérangé de sa position, chacun des demi-cercles colorés qui forment les images ordinaire et extraordinaire, prendrait des teintes différentes. Cette circonstance permet de régler la position de l'analyseur d'une manière beaucoup plus sûre que par le maximum et le minimum d'intensité d'une des deux images, comme nous l'avons indiqué d'abord; mais pour rendre cette opération encore plus exacte, l'épaisseur de la plaque biquartz a été déterminée de manière qu'une des deux images ait une teinte d'un rouge violacé pâle,

qui passe au rouge et au bleu par des mouvements contraires très-petits de l'analyseur. *d* est une plaque de quartz perpendiculaire à l'axe; *e* et *f* deux plaques de quartz prismatiques, dont l'axe coïncide avec celui de l'appareil, qui agissent en sens contraires de la plaque *d* : elles sont placées comme l'indique la fig. 1041, et peuvent glisser parallèlement l'une contre l'autre dans les deux sens, à l'aide de deux crémaillères engagées dans le même pignon, que le bouton *g* fait mouvoir. Par cette disposition, on amène dans l'axe de l'instrument une plaque d'une épaisseur variable; lorsque les zéros des échelles coïncident, l'épaisseur de la plaque formée des deux prismes est égale à celle de la plaque *d*, et comme la rotation a lieu dans des sens contraires, il y a compensation, et les teintes partielles des images ordinaire et extraordinaire sont les mêmes. L'une des échelles est divisée en parties égales, qui correspondent à des dixièmes de millimètre, de l'épaisseur de la lame formée des deux prismes; l'autre porte un vernier qui permet d'évaluer des centièmes de millimètre. En avant se trouve une petite lunette de Galilée. Le liquide sur lequel on veut opérer se place dans des tubes de verre épais fermés avec des glaces; on introduit ces tubes dans d'autres de cuivre, se fermant à vis par des bouchons qui compriment les plaques de verre. Les tubes ont 20 centimètres de longueur; on les place en N; on règle l'oculaire de la lunette de manière à voir nettement les lignes de séparation des images partielles, et on fait tourner le bouton *g* dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce que l'on ait obtenu l'égalité des teintes partielles des images; le vernier indique alors le sens de la rotation du liquide et l'épaisseur de quartz qui la compense. Pour rendre plus exacte l'appréciation du point de compensation, on cherche à obtenir la teinte sensible dont nous avons parlé, en plaçant en *h* des lames de verre bleu de différentes nuances.

La plaque formée de deux lames égales de quartz tournant en sens contraire avait déjà été employée par M. Arago dans des recherches photométriques; et le moyen d'obtenir une plaque d'épaisseur variable est due à M. Babinet; mais il ne l'avait employé que pour le verre.

Voici les résultats de quelques expériences que j'ai faites avec M. Soleil. Deux tubes égaux, de $99^{mm},7$ de longueur, et dont j'ai mesuré l'égalité avec un compas d'épaisseur disposé comme un sphéromètre [8], ont été remplis d'une même dissolution de sucre; l'épaisseur compensatrice a été trouvée de $0^{mm},85$; pour un seul,

cette épaisseur a varié de $0^{mm},42$ à $0^{mm},43$. Un des tubes rempli d'essence de térébenthine a été compensé par $1^{mm},45$ de quartz; l'appareil ne permettant pas de compenser deux tubes d'essence, on y a placé une plaque de quartz additionnelle tournant en sens contraire, dont l'épaisseur, mesurée par l'appareil lui-même, a été trouvée de $1^{mm},66$; alors les deux tubes d'essence réunis ont été compensés par une épaisseur de $1^{mm},22$; les deux compensations réunies sont de $2^{mm}88$; elle aurait dû être de $2^{mm},90$. En réunissant un tube d'essence et un tube de dissolution sucrée, comme les rotations sont en sens contraires, la compensation aurait dû être de $1,44 - 0,43 = 1,^{mm},01$; elle a été trouvée de $1^{mm},02$. D'après M. Biot, les déviations du quartz et de l'essence sont dans le rapport de $18^{\circ}\,24'$ à $0^{\circ}\,16'\,16''$, ou dans celui de 1104 à $16,25 = 67,94$; et d'après les expériences rapportées, elles sont dans le rapport de 99,7 à $1,45 = 68,7$.

Il semble, d'après ces expériences, que le phénomène compliqué qu'on observe, donne les mêmes résultats que l'observation directe de la rotation d'un même rayon simple; cependant, des considérations purement théoriques conduisent à reconnaître que la rotation d'une substance ne peut être exactement compensée par celle d'une autre, que dans des conditions particulières. En effet, représentons par n_r et n_v les indices de la première plaque pour les rayons rouges et violets, par n'_r et n'_v les indices correspondants de la seconde; les variations des plans de polarisation de ces rayons, par la première plaque, seront représentés par An^2_r et par An^2_v; les effets de la seconde plaque seront pareillement Bn'^2_r et Bn'^2_v; et pour que les plans de polarisation soient ramenés à la position primitive commune, il faut qu'on ait à la fois $An^2_r = Bn'^2_r$ et $An^2_v = Bn'^2_v$, et par suite $n'_r : n_r = n'_v : n_v$; ainsi, les indices de réfraction des rayons simples dans les deux milieux devront se trouver dans un rapport constant, circonstance qui ne peut se rencontrer que dans quelques cas particuliers. Mais, comme les indices de réfraction des rayons simples pour un même corps sont peu différents, leurs rapports ne doivent éprouver que des variations très-petites, et on conçoit que, quoique la compensation dont il est question ne puisse jamais s'effectuer exactement, l'erreur peut être trop petite pour que nous puissons l'apprécier. M. Biot a reconnu lui-même (*A. C. et P.*, t. IX) « que les substances douées du pouvoir rotatoire impriment aux plans de polarisation des divers rayons simples des dispersions presque identiques dans

leurs rapports. » J'ai fait d'ailleurs avec M. Soleil des expériences qui démontrent, que si la proportionnalité en question n'est pas rigoureusement exacte, l'œil ne peut pas s'en apercevoir. Lorsque la compensation avait lieu avec de la lumière blanche, j'ai observé les images avec des verres colorés, rouges, bleus, verts, jaunes, et avec une lampe monochromatique, et toujours les teintes des deux parties de chaque image m'ont paru parfaitement égales; alors, tout se passait comme si le système total n'eût été traversé que par un seul rayon, et, par conséquent, la compensation paraissait établie pour chacun. Mais, lorsqu'on emploie des verres colorés ou la lampe monochromatique, et qu'on cherche la compensation, l'incertitude est beaucoup plus grande que quand on se sert de lumière blanche, parce que l'on n'est guidé que par l'intensité des teintes partielles de chaque image, tandis que pour la lumière blanche, quand on a obtenu par des diaphragmes colorés la teinte sensible, les variations au rouge et au bleu, qui ont lieu simultanément dans les teintes partielles de chaque image, permettent d'atteindre avec une grande exactitude le point de compensation. Avec l'acide tartrique, on retrouve les mêmes anomalies qu'en observant directement la rotation d'un seul rayon simple.

Il serait à désirer que l'appareil de M. Soleil fût étudié avec soin par un expérimentateur habile : car si, comme on peut le présumer, on obtenait dans tous les cas, les mêmes résultats que par l'observation directe de la rotation d'un rayon simple ou de ceux que produisent la teinte sensible, les expériences sur la polarisation rotative deviendraient bien plus faciles qu'elles ne l'ont été jusqu'ici. Dans l'appareil de M. Soleil, l'azimut 0° et le point de compensation se déterminent avec grande précision; on peut opérer le jour et la nuit, sans chambre obscure, sur des liquides d'une coloration sensible, et avec une grande promptitude. Alors ces phénomènes si importants, par eux-mêmes et par leurs applications, seraient étudiés par un grand nombre de physiciens, que la nécessité d'une chambre obscure spéciale, la difficulté des observations, l'adresse, le soin et la patience qu'elles exigent quand on mesure directement la rotation d'un rayon, éloignent de ces recherches.

Mais il y a déjà un fait important bien constaté par de nombreuses expériences de M. Clerget. En soumettant à l'appareil de M. Soleil, des dissolutions de sucre de différente nature dans des proportions très-variées, et connues par des pesées, les épaisseurs des lames compensatrices correspondantes ont été trouvées exacte-

ment proportionnelles aux nombres des molécules de sucre traversées par le rayon de lumière, c'est-à-dire aux produits des longueurs des tubes par les quantités relatives de sucre renfermée dans les liquides. L'appareil de M. Soleil est donc déjà un instrument d'analyse d'une grande utilité dans les fabriques de sucre. M. Clerget a publié à ce sujet, dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, une instruction très-détaillée à laquelle nous renvoyons le lecteur.

1513. *Double réfraction produite dans les corps par la compression.* Dès l'origine de la découverte de la double réfraction, on a pensé qu'elle résultait de l'inégale élasticité des corps dans différentes directions. D'après cela, les corps qui réfractent simplement la lumière devaient acquérir la propriété des cristaux jouissant de la double réfraction, si leur constitution physique était modifiée de manière à faire varier leur élasticité dans différentes sens. Les expériences suivantes, dues à Fresnel, ont confirmé ces inductions théoriques.

Soient A, B, C, D (fig. 894) quatre prismes de verre égaux rectangulaires, placés les uns à côté des autres par les faces opposées à l'angle dièdre droit; supposons qu'on ait appliqué des cartons sur les bouts des prismes, ensuite des barres d'acier, et qu'à l'aide d'un ou de plusieurs étaux, on les ait fortement comprimés, de manière à en diminuer la longueur. Les prismes étant dans cet état de compression, on met entre eux cinq autres prismes E, F, G, H, I, réunis aux premiers avec de la térébenthine, et destinés à former avec eux un parallélipipède MNPQ. L'appareil étant ainsi disposé, si on regarde à travers les faces MN et PQ un objet situé à la distance d'un mètre, on aperçoit deux images qui jouissent de toutes les propriétés de celles qui se forment dans les cristaux doués de la double réfraction. La combinaison des prismes que nous venons d'indiquer est destinée à augmenter la déviation des deux images; elle serait insensible si on avait opéré sur un parallélipipède de verre. La cause de l'accroissement de déviation résulte du passage de la lumière dans des prismes qui sont alternativement comprimés et dans l'état naturel.

1514. La double réfraction produite par la compression développe dans la lumière polarisée des images colorées, analogues à celles que font naître les corps cristallisés, mais qui ont bien plus d'éclat et qui peuvent prendre des formes bien plus variées.

Lorsqu'on courbe une lame de verre longue et étroite, d'une

épaisseur à peu près égale à sa largeur, au moyen de l'appareil fig. 895, en faisant traverser la plaque de verre par de la lumière polarisée, que l'on reçoit ensuite à travers un analyseur quelconque, on voit de brillantes bandes colorées parallèles à sa longueur, symétriquement placées, et dont le nombre et l'éclat augmentent avec la compression (fig. 896).

Si l'on comprime une plaque de verre épaisse, rectangulaire, par exemple une plaque de glace de 2 à 3 centimètres de côté, au moyen de l'appareil fig. 897, il se produit, autour des centres de compression, des anneaux colorés très-brillants, semblables à ceux des plumes de paon. Quand le plan de polarisation de l'analyseur est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et que la direction de la ligne passant par les centres de compression est parallèle ou perpendiculaire à ce dernier plan, le champ éclairé est circulaire; il est traversé par une croix noire dont une des branches aboutit aux centres des anneaux (fig. 898); et quand la direction de la ligne des centres est inclinée de 45° au plan primitif de polarisation, les anneaux sont réunis par une bande colorée uniforme, rétrécie au centre (fig. 899).

M. Brewster a reconnu des phénomènes analogues dans les gelées animales comprimées entre deux lames de verre.

On conçoit facilement d'après cela, que la compression des plaques cristallisées change complétement la nature et la disposition des franges colorées qu'elles produisent dans la lumière polarisée.

1515. *Influence de la chaleur sur le verre.* On chauffe uniformément, dans l'huile bouillante, une plaque de verre circulaire, et on la place ensuite dans un anneau métallique de manière à refroidir promptement sa circonférence, la plaque, par suite de l'inégalité de température qui s'établit produit, dans la lumière polarisée, des anneaux circulaires avec une croix noire ou blanche, qui disparaissent lorsque le refroidissement est complet. En plaçant une plaque rectangulaire de verre épais dans un cadre métallique chauffé à une haute température, la plaque fait voir dans la lumière polarisée, une croix noire ou blanche, et aux quatre angles des anneaux colorés. Si l'on pose une plaque de verre par son bord inférieur sur une plaque métallique chauffée au rouge, les bandes irisées produisent la fig. 900; la symétrie provient probablement des modifications que la partie supérieure éprouve par suite de la dilatation des parties voisines de la plaque métallique. En croisant

deux plaques chauffées de la même manière, la partie commune présente des anneaux elliptiques.

1516. *Influence de la chaleur sur les plaques cristallisées.* Fresnel a observé que la chaleur dilate moins le sulfate de chaux dans la direction du plan des axes que dans une direction perpendiculaire; M. Mitscherlich a trouvé le contraire pour la chaux carbonatée, de sorte que par la chaleur, la forme primitive se rapproche du cube. Ce dernier physicien a reconnu que dans le sulfate de chaux la chaleur rapproche graduellement les deux axes, qui se réunissent à une certaine température, et au delà se séparent en marchant toujours dans le même sens. M. Brewster a observé le même phénomène dans la glaubérite.

1517. *Influence de la trempe sur les plaques de verre.* Si l'on chauffe au rouge des plaques épaisses de verre de différentes formes, et qu'on les refroidisse rapidement en les agitant dans l'air, elles prennent la propriété permanente de développer dans la lumière polarisée les plus brillantes couleurs; les franges colorées sont disposées de différentes manières, suivant la forme du contour de la plaque. Nous décrirons seulement les figures qu'on observe dans des plaques circulaires et carrées. Avec une plaque circulaire, on obtient les mêmes apparences qu'avec les cristaux à un axe taillés perpendiculairement à l'axe : on voit des anneaux colorés traversés par une croix noire ou blanche, suivant la position de la section principale de l'analyseur; mais les anneaux sont moins nombreux et moins nets. Lorsqu'on emploie une plaque carrée, et que l'analyseur est placé d'abord de manière à absorber complétement la lumière réfléchie par la glace, et en suite à 90°, on obtient les figures 901 et 902, qui sont d'une grande régularité. Avec des plaques triangulaires, on voit des figures différentes et des systèmes d'anneaux à chaque angle. Ces figures sont exactement les mêmes que celles qu'on produit en mettant des plaques de verre non trempé dans des cadres métalliques de même forme et fortement chauffés.

La double réfraction du verre trempé peut être constatée directement par l'expérience. On prend un prisme de verre trempé ayant un angle au sommet de 90°, et, après l'avoir divisé en quatre, on range ces quatre prismes A, B, C, D (fig. 894) sur une plaque de verre, et l'on remplit les intervalles par des prismes E, F, G, H, I, de verre ordinaire collés avec de la térébenthine; en observant à travers tous ces prismes, un fil placé à un ou deux

mètres, et parallèle aux arêtes des prismes, on voit deux images très-distinctes (M. Guérard).

1518. *Influence de l'induration.* Lorsqu'on fait sécher de la colle de poisson dans un moule de verre circulaire, la plaque donne des anneaux circulaires avec une croix, comme les plaques circulaires de verre trempé; avec des moules de différentes formes on obtient des figures analogues à celles des lames de verre trempé de même forme. On en conçoit facilement la raison, car la dessiccation produit un effet de même nature que celui qui résulte de la trempe (Brewster).

1519. Dans l'appareil de M. de Noremberg, les images colorées produites artificiellement dans les plaques, par la compression, la chaleur, la trempe et l'induration, sont beaucoup plus brillantes et les franges sont beaucoup plus nombreuses, quand les plaques sont placées sur la glace étamée, que quand on les met sur la glace IK, ou qu'on emploie tout autre appareil polarisant. Ainsi, par exemple, avec un verre circulaire trempé vu dans une glace noire, avec une tourmaline, on n'aperçoit qu'un seul système d'anneaux placé près de la circonférence, tandis que la même plaque mise sur la glace EF de l'appareil de M. de Noremberg en laisse apercevoir trois bien distincts. Avec une plaque carrée de verre trempé, les croix blanches et noires des fig. 901 et 902 sont environnées de quatre franges colorées, parallèles à la frange unique de ces deux figures. Cette différence provient de ce que, dans l'appareil de M. de Noremberg, quand la plaque est placée sur la glace étamée, elle est traversée deux fois par la lumière polarisée, et se comporte comme si son épaisseur était double, circonstance qui diminue la largeur des franges et en augmente le nombre.

Tous les phénomènes produits, par la compression, la chaleur, la trempe, l'induration, diffèrent de ceux que présentent les plaques cristallisées, par ces deux circonstances essentielles, que les figures dépendent de la forme du contour des plaques, et qu'elles se produisent dans la lumière parallèle, tandis que dans les lames cristallisées elles sont indépendantes de la forme des plaques, et qu'elles exigent de la lumière convergente. De la première circonstance il résulte que, dans les lames cristallisées, les phénomènes dépendent d'une structure qui est la même autour de chaque normale, tandis que dans les lames chauffées ou comprimées ils dépendent de l'élasticité de l'ensemble. Aussi, pour observer les

phénomènes des lames cristallisées, il suffit de regarder à travers une partie quelconque de leur surface; tandis que, pour observer les couleurs développées artificiellement dans les plaques, il faut les voir dans toute leur étendue. C'est pourquoi ces derniers phénomènes ne peuvent pas être observés en plaçant les plaques entre deux tourmalines, qu'il faut employer les appareils fig. 869 et 879, ou la lumière réfléchie par une glace, et un analyseur quelconque.

1520. M. Hardinger a observé à l'œil nu, dans la lumière polarisée qui sort de certains cristaux, des taches jaunes ou des houppes lumineuses, dirigées dans le plan de polarisation, et au moyen desquelles on peut déterminer la position du plan de polarisation sans instruments et sans appareils. Ces phénomènes singuliers ont été décrits dans une lettre de M. l'abbé Moigno à M. Arago (*C. R.*, n° 4, 1826). D'après M. Silbermann ils proviennent de la structure de l'œil : la partie antérieure de l'œil et le cristallin jouiraient de la double réfraction et de la propriété de donner les couleurs ordinaires de la polarisation chromatique, et la structure fibreuse et rayonnée du cristallin produirait l'effet d'un analyseur dans toutes les directions (*C. R.*, n° 13, 1846).

1521. *Absorption de la lumière polarisée par les cristaux.* Les cristaux colorés jouissent presque tous de la propriété d'absorber inégalement la lumière homogène qui les traverse dans différentes directions, et, par conséquent, d'avoir dans la lumière blanche différentes couleurs par transmission : ainsi le chlorure de palladium est d'un rouge foncé vu dans le sens de l'axe, et d'un vert brillant dans la direction transversale (Wollaston); l'iolithe ou dichroïte présente le même phénomène. Cette propriété porte le nom de *dichroïsme*. On peut facilement reconnaître cette inégale absorption, en prenant des plaques assez épaisses qu'on fait traverser par la lumière polarisée : en regardant directement à travers, les teintes ne sont pas les mêmes quand la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation. La propriété de la tourmaline, d'absorber complétement, sous une certaine épaisseur, la lumière polarisée parallèlement à sa section principale, rentre évidemment dans la classe des phénomènes de dichroïsme.

§ 9. *Polarisation de la chaleur.*

1522. En 1810, M. Bérard avait annoncé que la chaleur

rayonnante obscure éprouvait la double réfraction et se polarisait comme la lumière. Depuis MM. Powell, Lloyd et Nobili avaient vainement essayé de reproduire les faits annoncés par M. Bérard, relativement à la polarisation par réflexion.

En 1833, M. Melloni fit de nombreuses expériences pour reconnaître si un faisceau de chaleur qui traversait deux plaques de tourmaline parallèles, éprouvait une variation d'intensité quand on changeait l'angle des axes; mais les faisceaux transmis avaient toujours la même intensité, que les axes fussent parallèles, ou perpendiculaires (*A. C. et P.*, t. LXVIII, p. 373). Il est important de remarquer, qu'une diminution dans l'intensité du faisceau transmis, quand les axes, d'abord parallèles, sont ensuite placés perpendiculairement, serait un indice que la chaleur se polarise en traversant les plaques, mais que l'égalité de l'intensité du faisceau lorsque les axes ont une direction quelconque, ne prouve rien relativement à la non polarisation de la chaleur par les tourmalines : car, pour la lumière, l'absorption n'est pas une conséquence nécessaire de la polarisation : la lumière qui traverse une plaque de tourmaline est toujours complétement polarisée parallèlement et perpendiculairement à l'axe, tandis que la propriété d'absorber la lumière polarisée dans la première direction, varie avec la nature et l'épaisseur des plaques, et il en est qui, sous une faible épaisseur, transmettent presque également les deux faisceaux polarisés.

Mais à la fin de 1834, M. Forbes reconnut des variations bien marquées dans les quantités de chaleur transmises par deux plaques de tourmaline dont on changeait la position des axes; et, en outre, que si un faisceau de chaleur traversait successivement deux systèmes de lames minces de mica inclinés, formés chacun de lames parallèles dans la position qu'elles occupaient avant le clivage, et dont l'un pouvait tourner autour de l'axe du faisceau en conservant l'angle qu'il formait avec lui, la quantité de chaleur transmise était plus grande quand les plans d'incidence étaient parallèles, que quand ils étaient perpendiculaires. Cette circonstance existe pour la lumière, car un faisceau de lumière qui a traversé une pile de lames parallèles, inclinées à sa direction, est en partie polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, et cette partie de la lumière serait complétement absorbée par une seconde pile placée de manière que le plan d'incidence fût perpendiculaire au premier. Les expériences de M. Forbes démontraient donc le fait de la polarisation de la chaleur, que, jusqu'alors, on devait, avec raison, révo-

quer en doute. Dans les expériences de M. Forbes, l'absorption de la chaleur par les piles de mica variait avec la nature des sources.

Depuis, M. Melloni a étudié avec beaucoup de soin la polarisation de la chaleur : ses expériences ont confirmé celles de M. Forbes, relativement au fait de la polarisation par les tourmalines et les piles de mica ; mais il est arrivé à des conséquences opposées sous le rapport de l'influence de la nature des sources. Nous décrirons succinctement l'appareil employé par M. Melloni, et nous rapporterons les principaux résultats qu'il a obtenus.

1523. L'appareil consistait en un multiplicateur d'une grande sensibilité, en relation avec une pile thermo-électrique, dont une des extrémités recevait le faisceau de chaleur, après qu'il avait traversé deux tourmalines dont les axes étaient successivement parallèles et perpendiculaires. Mais, pour éviter toute influence étrangère, la pile était renfermée dans une cloche garnie de deux orifices latéraux dans la direction de l'axe de la pile ; et, pour obtenir un accroissement d'intensité dans les faisceaux incidents et émergents, la chaleur émanée de la source était reçue sur une large lentille de sel gemme, et arrivait ensuite à la pile en traversant une seconde lentille de la même substance, d'un plus court foyer, placée à une distance du foyer de la première égale à sa distance focale principale. Le système des deux tourmalines était placé au delà du foyer commun des deux lentilles, afin que les rayons provenant de l'échauffement des tourmalines fussent divergents après la seconde lentille, et n'arrivassent point à la pile. La première lentille avait 67 millimètres de diamètre et 81 millimètres de distance focale, la seconde 29 millimètres de foyer. Avec certaines tourmalines et une lampe sans verre et à réflecteur placée à 1 mètre, les déviations étaient portées de 60° à 80°. M. Melloni a employé différentes espèces de tourmalines, différentes sources de chaleur et différentes plaques diathermanes ; il observait les déviations, lorsque les axes des tourmalines étaient successivement parallèles et perpendiculaires ; des déviations il déduisait les intensités relatives des rayons de chaleur absorbés par la pile dans ses différentes positions ; il estimait ensuite, pour les différentes sources lumineuses, la perte de chaleur en centièmes de la quantité de chaleur transmise quand les axes étaient parallèles.

1524. En employant la flamme d'une lampe de Locatelli (lampe sans verre), l'absorption varie avec la nature des tourmalines de

3,71 à 22 centièmes; les tourmalines vert-foncé et jaune-fauve donnent les limites extrêmes.

En se servant du système des tourmalines qui produisait la plus grande absorption, et plaçant dans le faisceau incident des plaques diathermanes de différentes natures, M. Melloni a trouvé que les verres de différentes couleurs ne changent pas sensiblement l'absorption, excepté les verres verts et noirs opaques, qui la font baisser de 22 à 2 ou 3; que, pour la chaux sulfatée, l'ambre jaune, l'eau pure ou chargée de sels, et l'alun, les quantités de chaleurs absorbées s'élèvent de 22/100 à 38/100, 51/100, 67/100 et 96/100. Ainsi, pour la chaleur qui sort de l'alun, l'absorption est aussi complète que pour la lumière.

Les mêmes expériences, répétées avec d'autres couples de tourmalines qui absorbaient moins la chaleur directe de la source, ont donné d'autres résultats.

En employant les mêmes tourmalines et d'autres sources de chaleur, on obtient aussi des résultats différents.

Les variations d'effets produits sur la même source de chaleur par différentes tourmalines, et sur les mêmes plaques par différentes sources, proviennent, sans aucun doute, de ce que toutes les tourmalines n'ont pas le même pouvoir absorbant pour les rayons de même nature, et de ce que les différentes sources sont formées, en proportions différentes, de rayons inégalement absorbables par les tourmalines.

M. Melloni a fait aussi de nombreuses expériences sur la polarisation de la chaleur par les lames de mica. Il a constaté que toutes les sources agissaient de la même manière, et que si M. Forbes a observé des différences, elles doivent être attribuées à l'inégal échauffement de la pile, qui recevait directement le faisceau de chaleur. M. Melloni a ensuite reconnu les faits suivants : « 1° la proportion de chaleur polarisée par les piles est d'autant plus grande que l'angle sous lequel les rayons rencontrent leurs surfaces est moindre; 2° dans les piles contenant un nombre suffisant d'éléments, la polarisation calorifique atteint, à un certain angle d'inclinaison, un maximum d'effet qu'elle conserve ensuite pour toutes les inclinaisons plus petites que les rayons peuvent former successivement avec les lames; 3° l'inclinaison, comptée toujours à partir de la surface, où commence à se montrer l'effet invariable, augmente avec le nombre de lames dont les piles sont composées. » Nous renvoyons, pour les détails, aux mémoires de M. Melloni (*A. C. et*

P., t. LXI et LXV), dans lesquels, cet habile physicien a déduit de ses expériences que, sous les rapports de la réflexion, de la réfraction et de la polarisation, la chaleur rayonnante se comporte exactement comme la lumière.

§ 10. *Action des courants électriques sur la lumière.*

1525. En 1845, M. Faraday a découvert un fait extrêmement remarquable, et qui semble indiquer l'existence d'une action des courants électriques sur la lumière (*A. C. et P.*, t. XXVII). Voici d'abord l'appareil au moyen duquel on peut le constater : nous choisissons la disposition de M. Ruhmkorff, comme la plus simple et la plus efficace (*C. R.*, t. XXIII). A et B (fig. 1042) sont deux électro-aimants creux, couverts chacun de 150^{m} de fil de cuivre d'un millimètre de diamètre; ils sont placés horizontalement, à une petite distance, et de manière que leurs axes se confondent. A chacune des extrémités du canal se trouve un prisme de Nicol *a* et *b*, disposés de manière que leurs sections principales soient perpendiculaires; dans cette position, l'œil étant placé en *a*, et le prisme *b* étant éclairé par une lampe, l'œil ne reçoit point de lumière. Si on met les extrémités des fils des électro-aimants en communication avec les pôles d'une forte pile électrique, rien ne sera changé; mais si on place en M un corps solide transparent à faces parallèles, ou un liquide renfermé dans un tube de verre fermé par des glaces, la lumière reparaît; et si le liquide a la propriété de faire tourner le plan de polarisation, sa teinte sera changée par l'action du courant, et variera avec le sens du mouvement de l'électricité qui parcourt le fil. Ces phénomènes indiquent un déplacement dans la direction du plan de polarisation qui traverse le corps, déplacement qui est occasionné par l'action des électro-aimants. La matière qui éprouve la plus grande action est un verre formé de silice, d'acide borique et de plomb. M. Pouillet a vérifié les expériences de M. Faraday en employant un ou plusieurs aimants en fer à cheval, et l'appareil de M. Soleil décrit au n° 1512; l'égalité des teintes dans chacune des images produites par la plaque biquartz, étant établie, elle disparaissait quand le corps interposé était soumis à l'action des pôles des aimants. M. E. Becquerel a fait aussi de nombreuses expériences à ce sujet en employant un électro-aimant très-puissant et deux prismes de Nicol; il a obtenu des effets sensibles avec un grand nombre de substances solides et liquides.

M. Faraday avait annoncé que les plaques cristallisées, taillées perpendiculairement à l'axe, ne produisaient aucun effet; mais E. M. Becquerel a obtenu des rotations très-appréciables du plan de polarisation dans le quartz, en détruisant le pouvoir rotatoire naturel de cette substance par la réunion de deux plaques égales agissant en sens contraires (*A. C. et P.*, t. XVII). Les lois de ces phénomènes sont encore inconnues, et on ne sait pas si la rotation du plan de polarisation provient d'une action réelle des courants électriques et de la lumière, ou d'une action magnétique exercée par tous les corps, qui modifierait leur effet sur la lumière.

§ 11. *Météores lumineux.*

1526. Les phénomènes lumineux qui se développent dans l'atmosphère sont nombreux; nous les examinerons successivement.

1527. *Crépuscule.* On désigne ainsi la lumière qui précède le lever du soleil et qui suit son coucher : le crépuscule du matin porte aussi le nom d'*aurore*. Le crépuscule du soir et du matin provient de la réflexion de la lumière par les parties supérieures de l'atmosphère. L'aurore commence quand le soleil est encore à 18° sous l'horizon; le crépuscule finit quand le soleil est descendu plus bas, parce que l'atmosphère échauffée est plus élevée le soir que le matin. En admettant qu'à la fin du crépuscule du soir la lumière provienne de la réflexion par les dernières limites de l'atmosphère, la durée du crépuscule peut servir à déterminer une valeur approchée de la hauteur de l'atmosphère : en effet, désignons par t la durée du crépuscule estimée en heures, t : 24 sera l'arc décrit par le soleil au-dessous de l'horizon, la circonférence étant 1, et cet arc en degrés sera $t \times 360 : 24$; nous le désignerons par θ. Cela posé, soient a (fig. 903) un point de la terre, om le rayon de la limite de l'atmosphère : à la fin du crépuscule, les rayons solaires réfléchis à la limite de l'atmosphère seront dans la direction ma de l'horizon du point a, et les rayons solaires auront la direction mp ou or; l'angle qor sera θ, l'angle amo sera égal à $90° - \frac{\theta}{2}$; et, en connaissant le rayon oa de la terre, on pourra, dans le triangle rectangle moa, calculer mo, et par suite $mo - ao$. On a trouvé ainsi environ 71,000 mètres pour la hauteur de l'atmosphère. Quelques physiciens pensent que, pour déterminer la hauteur par la durée du crépuscule, il faudrait considérer plusieurs réflexions.

1528. *Déviation des rayons qui traversent l'atmosphère.* L'atmosphère ayant une densité décroissante à partir de la surface de la terre, tous les rayons qui ne le traversent pas perpendiculairement aux surfaces de même densité sont déviés et se rapprochent de la verticale d'une manière continue, de sorte que la lumière suit réellement une trajectoire curviligne (fig. 904). Or, comme nous jugeons toujours de la position des corps par la direction des rayons qui arrivent à l'œil, il s'ensuit que nous voyons les corps plus élevés qu'ils ne le sont réellement, et d'autant plus qu'ils sont plus près de l'horizon; à l'horizon, cet effet est à peu près de 30′.

Rayons divergents. Lorsque les rayons solaires pénètrent dans une chambre obscure, les parcelles de poussière répandues dans l'air qu'ils éclairent les rendent visibles. On conçoit d'après cela qu'on doit apercevoir aussi les rayons de lumière qui passent à travers les interstices des nuages obscurs qui sont placés du côté du soleil. Ces rayons sont parallèles, et cependant paraissent divergents du côté du soleil, parallèles au zénith, et convergents vers le point opposé du ciel. Ces apparences sont évidemment un effet de perspective : les rayons paraissent plus rapprochés dans les parties les plus éloignées du spectateur.

1529. *Mirage.* Nous avons vu que, quand un rayon lumineux sortait d'un milieu pour entrer dans un autre d'une moindre densité, le rayon s'écartait de la normale, et que la réfraction se changeait en réflexion, lorsque les rayons étaient suffisamment inclinés sur la surface de séparation. On conçoit dès lors que, si le milieu ABCD (fig. 905) allait en décroissant de densité de AB en CD, des rayons partis du point M et suffisamment inclinés se relèveraient à une certaine profondeur, d'autant plus grande qu'ils seraient moins inclinés, et, par conséquent, on apercevrait deux images de l'objet : l'une droite, provenant des rayons directs; l'autre renversée, provenant des rayons qui auraient éprouvé une espèce de réflexion. Cette circonstance se rencontre dans les grandes plaines sablonneuses fortement échauffées par les rayons solaires : les couches d'air immédiatement en contact avec le sol se trouvant à une température plus élevée que les couches supérieures, on y aperçoit distinctement les images droite et renversée des objets placés à l'horizon. Le mirage a été souvent observé par l'armée française pendant l'expédition d'Égypte. Le sol de la basse Égypte est une vaste plaine, dont l'uniformité n'est interrompue

que par quelques éminences où sont placés les villages : lorsque la surface du sol est échauffée par la présence du soleil, le terrain semble terminé par une inondation générale; chaque monticule présente au-dessous son image renversée comme s'il était entouré d'eau. Le mirage a lieu aussi quelquefois en mer; mais il est moins fréquent et plus faible que sur terre. Ces phénomènes ont encore été observés par MM. Biot et Mathieu aux environs de Dunkerque. On peut les produire artificiellement, en exposant à l'ardeur du soleil une longue barre de fer noircie, ou en faisant chauffer inférieurement une plaque de tôle horizontale, et regardant par une de ses extrémités des objets peu élevés au-dessus de l'autre. Les inflexions que les rayons de lumière éprouvent en traversant l'atmosphère, dont la densité, près de la surface de la terre, varie inégalement, dans les lieux voisins, par l'inégalité d'échauffement du sol, produisent souvent des phénomènes singuliers, qu'on expliquerait facilement en examinant les circonstances locales. Quelquefois l'image unique est seulement relevée; d'autres fois, on aperçoit deux images symétriques par rapport à une ligne horizontale ou verticale.

1530. *Arc-en-ciel.* L'arc-en-ciel est, comme on sait, une couronne présentant toutes les couleurs du spectre solaire, qui apparaît quand les rayons du soleil viennent frapper un nuage qui se résout en pluie, et que l'observateur tourne le dos au soleil. On aperçoit ordinairement deux arcs concentriques; dans l'arc extérieur, les couleurs, en commençant par la partie la plus élevée, se succèdent dans l'ordre suivant : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge; dans l'arc intérieur, les couleurs suivent un ordre inverse. Le centre de l'arc-en-ciel est toujours placé sur la ligne qui passe par le centre du soleil et l'œil du spectateur. Le phénomène de l'arc-en-ciel s'observe aussi dans cette espèce de pluie artificielle que produisent les jets d'eau.

Il résulte des circonstances que nous venons de décrire, que ce phénomène est dû à l'influence des gouttes d'eau sur les rayons solaires. Pour trouver en quoi elle consiste, considérons d'abord un seul rayon extrêmement délié de lumière homogène, et examinons sa marche dans une goutte d'eau sphérique : au point d'incidence, une partie du rayon sera réfléchie, et une autre réfractée; au point de rencontre du rayon réfracté avec la surface de la sphère, le rayon se divisera encore en deux autres, dont l'un sera réfléchi et l'autre réfracté, et ainsi de suite. Considérons maintenant un large

faisceau de rayons incidents homogènes : chacun d'eux éprouvera la même série de réflexions et de réfractions; mais comme leurs premières incidences sur la goutte d'eau sont différentes, ils ne resteront pas parallèles, et les rayons qui sortiront, après un même nombre de réflexions intérieures, se disperseront dans tous les sens. Cependant leur écart ne sera point constant, et il est facile de prévoir que les rayons émergents seront sensiblement parallèles lorsque l'incidence sera telle que la déviation des rayons émergents sur le rayon incident, soit un maximum ou un minimum : car c'est une propriété générale des quantités qui passent par un maximum ou un minimum de n'éprouver que de faibles variations dans le voisinage de ces états : par conséquent, les rayons incidents qui seront très-voisins de celui qui correspond au maximum ou au minimum de déviation produiront des rayons émergents sensiblement parallèles. Donc, si l'on conçoit un faisceau de rayons parallèles qui viennent frapper la moitié de la surface d'une sphère liquide, tous les rayons émergents, après un même nombre de réflexions, formeront un faisceau dont les rayons se disperseront dans tous les sens, excepté ceux qui correspondent au maximum ou au minimum de déviation, qui seront sensiblement parallèles. Ces derniers seuls seront appréciables à l'œil, parce que cet organe ne peut pas être affecté par des rayons isolés; c'est pour cette raison que Newton les a nommés *rayons efficaces*.

Dans ce qui précède, nous avons supposé les rayons homogènes; mais s'ils étaient formés de lumière blanche, chaque rayon, en pénétrant dans la sphère liquide, se décomposerait, chaque rayon élémentaire suivrait une marche différente, et chaque système de rayons d'une même teinte donnerait un rayon efficace distinct : car la direction de ce rayon dépend de sa réfrangibilité, et nous savons qu'elle varie avec la couleur. On trouve par le calcul que les rayons efficaces de lumière rouge, dont l'indice de réfraction est 108/81, correspondant à une seule réflexion intérieure dans une sphère d'eau, ont une incidence de 59° 30′, et une déviation de 42° 2′; que, pour deux réflexions intérieures, l'incidence est de 71° 49′ 55″, et la déviation de 50° 58′ 50″; que pour les rayons violets extrêmes, dont l'indice de réfraction est de 109/81, pour une réflexion intérieure l'incidence est de 58° 40′ 0″, la déviation de 40° 17′, et pour deux réflexions, l'incidence est de 71°, et la déviation de 54° 9′. Les incidences et les déviations des rayons intermédiaires seront évidemment comprises entre ces limites.

On peut aussi déterminer la position des rayons efficaces par de simples considérations de symétrie. Soit MBDE (fig. 906) la section de la goutte d'eau par le plan mené par l'œil de l'observateur et le centre du soleil. Pour qu'un faisceau ABab devienne efficace après une seule réflexion, il faut que le faisceau réfracté converge en un point D de la circonférence : car alors, par la réflexion, il formera un faisceau DeE symétrique à BbD, et qui, en repassant dans l'air, produira un faisceau EeFf de rayons parallèles.

Pour que le faisceau ABab (fig. 907) devienne efficace après deux réflexions, il faut que les rayons deviennent parallèles après la première : car le faisceau EeFf sera symétrique au faisceau B$b$$d$D, et, par conséquent, le faisceau émergent sera composé de rayons parallèles. Il est facile de voir que, pour qu'un faisceau devienne efficace après trois réflexions (fig. 908), il faut que la seconde réflexion ait lieu en un seul point. De même, pour qu'ils deviennent efficaces après quatre réflexions, ils doivent devenir parallèles après la seconde. Pour sortir parallèles après cinq réflexions, ils doivent concourir en un seul point de la circonférence après la seconde réflexion. En général, pour devenir efficaces après p réflexions, il suffit qu'ils soient parallèles après $\frac{p}{2}$ réflexions, si p est un nombre pair, et qu'ils concourent sur la circonférence après $\frac{p-1}{2}$ réflexions, si p est impair.

Cela posé, reprenons le cas de la fig. 906 : représentons par a l'angle d'incidence abc', par b l'angle de réfraction cbD, et par n l'indice de réfraction. Le rayon incident ab, se mouvant parallèlement à lui-même d'une quantité infiniment petite, prend la position AB, et l'angle d'incidence devient ABc''; l'accroissement infiniment petit de l'angle d'incidence que nous représenterons par δi est mesuré par l'arc Bb, et l'accroissement δr de l'angle de réfraction, étant égal à l'angle BDb, est mesuré par la moitié de l'arc Bb : on a donc dans ce cas

$$\delta i = 2\delta r.$$

Dans le cas de deux réflexions (fig. 907), le faisceau dDeE est formé de rayons parallèles : on aura donc

$$\mathrm{D}d = \mathrm{E}e; \quad \text{mais } \mathrm{BD} = \mathrm{DE}, \quad \text{et } bd = de :$$

donc $$bd - \mathrm{BD} = de - \mathrm{DE} = 2\mathrm{D}d.$$

Or, $$bd - \mathrm{BD} = \mathrm{B}b - \mathrm{D}d;$$

donc, enfin, $$\mathrm{B}b = 3\mathrm{D}d.$$

Dans ce cas, on a $\delta i = \mathrm{B}b$, $\delta r = \frac{\mathrm{B}b - \mathrm{D}d}{2} = \mathrm{D}d$;

et, par conséquent, $$\delta i = 3\delta r.$$

Pour le faisceau qui doit devenir efficace après trois réflexions, on trouverait

$$\delta i = 4\delta r;$$

et, en général, pour le faisceau qui doit devenir efficace après p réflexions, on trouverait $$\delta i = (p+1)\delta r.$$

Mais on a $\sin i = n \sin r \ldots.$ (1);

et, en différenciant, $\cos i \partial i = n \cos r \partial r$:

donc $(p+1)\cos i = n \cos r \ldots.$ (2).

En combinant les équations (1) et (2), on en déduit

$$\sin i = \pm\sqrt{1 - \frac{n^2-1}{p(p+2)}}, \quad \sin r = \pm\frac{1}{n}\sqrt{1 - \frac{n^2-1}{p(p+2)}}.$$

Les angles i et r étant connus, il est facile d'en déduire les angles que les rayons efficaces font avec les rayons incidents : en effet, soient SA (fig. 909) la direction des rayons incidents, FB celle des rayons émergents, on a

$$AOC = \pi - i - ACO;$$

or, $ACO = \frac{ACF}{2} = \frac{ACD}{2}(p+1)$, et $ACD = \pi - 2r$;

donc $AOF = 2AOC = 2r(p+1) - 2i - \pi(p-1)$.

Cette valeur de AOF ne renfermant que la quantité p et les angles i et r, il s'ensuit que l'angle des rayons solaires et des rayons efficaces ne dépend que de la couleur des rayons et du nombre des réflexions. Pour déterminer les valeurs numériques de l'angle AOF, il faut faire $n = \frac{4}{3}$ pour les rayons rouges, et $n = \frac{109}{81}$ pour les rayons violets : on trouve ainsi les valeurs que nous avons rapportées précédemment.

M. Babinet a trouvé qu'en désignant par d la déviation AOF, et par m l'indice de réfraction, on pouvait éliminer les angles i et r, et qu'on obtenait pour la déviation relative à une seule réflexion

$$\sin^2\frac{d}{2} = \frac{(4-m^2)^3}{27m^4};$$

et, pour celle relative à deux réflexions,

$$\sin\frac{d}{2} = \frac{m^4 + 18m^2 - 27}{8m^3}.$$

Supposons maintenant dans l'air, un grand nombre de globules d'eau se succédant rapidement dans leur chute : tout se passera comme si chacun d'eux était immobile. Considérons d'abord les rayons envoyés par le centre du soleil, que nous pouvons, sans erreur appréciable, considérer comme parallèles; soit O (fig. 910) la position de l'œil : si nous menons la ligne OC parallèle aux rayons solaires, et la droite OV faisant avec OC un angle de 40° 17′, il est évident que les gouttes d'eau qui se trouveront

dans cette direction enverront à l'œil des rayons efficaces violets, après une seule réflexion intérieure. En menant de même les lignes OR, OV′, OR′, de manière que ROC = 42° 2′, R′OC = 50° 59′, et V′OC = 54° 9′, l'œil recevra suivant OR des rayons efficaces rouges après une seule réflexion intérieure, et suivant OR′ et OV′ des rayons rouges et violets après deux réflexions intérieures; et, dans les directions comprises entre VO et RO, V′O′ et R′O′ les rayons efficaces des couleurs intermédiaires. Ainsi, s'il n'y avait qu'une série verticale de globules d'eau, l'œil apercevrait deux spectres très-minces, dont les teintes se succéderaient en sens contraire, et dont le plus élevé aurait une intensité moindre que celui qui est inférieur, à cause de la double réflexion intérieure qu'ont éprouvée les rayons qui le forment. Mais si l'espace occupé par les globules a une étendue suffisante; ces spectres auront lieu dans tous les plans passant par OC et se trouveront à la même distance angulaire de OC : par conséquent, l'œil apercevra deux systèmes de bandes circulaires colorées, ayant pour centre le point C, dont les rayons violets formeront les cercles extérieurs et intérieurs. Le diamètre apparent de la bande colorée intérieure sera égal à 42° 2′ — 40° 17′ ou 1° 45′; celui de la bande extérieure sera de 54° 9′ — 50° 58′ ou de 3° 11′, et la distance des deux bandes sera 50° 59′ — 42° 2′ ou 8° 57′.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que le soleil n'était qu'un point; mais il n'en est pas ainsi, son diamètre apparent est d'environ 30′ : par conséquent, chaque point du soleil formera un arc-en-ciel ayant les dimensions déterminées plus haut, et c'est la superposition de tous ces arcs partiels qui ne coïncident pas, qui formera l'arc observé. Pour déterminer les dimensions de cet arc total, observons que les arcs qui sont produits par les points de la circonférence du soleil ont leur centre sur la ligne menée par l'œil et par chacun de ces points : par conséquent, tous les arcs formés par la surface du soleil auront leur centre dans le cercle qu'on décrirait autour du point C, et dont le diamètre apparent serait égal à celui du soleil. Ainsi la bande violette résultant d'une seule réflexion intérieure sera formée par tous les cercles ayant leurs centres dans la surface du cercle C′C″, et qui auront pour demi-diamètre apparent 40° 17′; or, il est évident (fig. 910 A) que cette bande aura pour épaisseur 30′, ainsi que toutes les autres : il résulte de là que le cercle extérieur sera plus grand de 15′ que celui qui correspond au centre du soleil, et que le cercle intérieur sera

plus petit de la même quantité. On aura donc pour les différents éléments les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} ROC &= 42^\circ\ 2' + 15' = 42^\circ\ 17', \\ ROV &= 40^\circ\ 17' - 15' = 40^\circ\ 2', \\ R'OC &= 50^\circ\ 59' - 15' = 50^\circ\ 44', \\ V'OC &= 54^\circ\ 9' + 15' = 54^\circ\ 24'. \end{aligned}$$

Il est facile de déduire de là que l'épaisseur de l'iris intérieur sera de 2° 15', celle de l'iris extérieur de 3° 40', et leur distance de 8° 27'. On prévoit aisément qu'à cause de la largeur de chaque bande colorée et de leur superposition dans chaque iris, les couleurs seront beaucoup moins vives que dans la supposition où le corps éclairant serait réduit à un point.

Toutes les circonstances que nous venons de décrire sont d'accord avec l'observation ; Newton, en mesurant les diamètres apparents des différents cercles colorés d'un arc-en-ciel, a trouvé exactement les nombres indiqués par la théorie.

1531. On peut facilement produire les franges colorées qui correspondent aux arcs-en-ciel de différents ordres avec un cylindre de verre de 10 millimètres de diamètre, éclairé par des rayons solaires ou la lumière d'une bougie : la première frange se trouve déviée de 20°, et la seconde à peu près de 90° ; M. Babinet est parvenu à voir distinctement la septième frange. On peut également observer les franges sur des veines liquides cylindriques et verticales.

1532. M. Babinet a produit les franges correspondantes aux arcs-en-ciel de différents ordres avec des cylindres de cristaux biréfringents ; les arcs du premier ordre seulement étaient doubles : d'où il suit que les rayons extraordinaires s'affaiblissent par des réflexions successives plus que les rayons ordinaires, ce qui s'accorde très-bien avec la théorie des ondulations, comme nous le verrons plus loin. Il résulte de la formule de M. Babinet (p. 565) qui donne la valeur de la déviation d pour l'arc du premier ordre, que cette valeur deviendrait imaginaire pour le diamant, car pour cette substance on a $m > 2$.

1533. Il résulte de la théorie de l'arc-en-ciel, que l'intensité de la lumière des bandes colorées est d'autant plus grande que les globules d'eau ont un plus grand diamètre, car les sections des rayons efficaces augmentent avec ces diamètres ; c'est d'ailleurs ce que M. Babinet a vérifié par l'expérience. On conçoit alors pour-

quoi les petits globules d'eau qui constituent les nuages ne produisent pas d'arcs-en-ciel.

1534. Indépendamment des arcs de différents ordres dus aux réflexions successives de la lumière dans les gouttes d'eau, il existe d'autres arcs qu'on a désignés sous le nom de *secondaires* ou de *surnuméraires* : on ne les aperçoit que rarement; ils sont au nombre de 4 ou 5 qui bordent les limites intérieure et extérieure de l'arc-en-ciel du premier ordre. On peut facilement les reproduire au moyen d'un filet d'eau vertical d'un millimètre de diamètre. Les arcs secondaires proviennent des interférences des rayons qui ont éprouvé des déviations égales de part et d'autre du minimum.

1535. Lorsqu'on observe des arcs-en-ciel en pleine mer, et que sa surface est calme, les rayons solaires réfléchis ont la même direction que si le soleil était au-dessous de l'horizon de la même quantité dont il le dépasse, et, par conséquent, les rayons réfléchis produisent des arcs par réflexion dont le centre est élevé au-dessus de l'horizon. Les arcs directs et indirects se coupent deux à deux à l'horizon.

1536. La lumière de la lune produit aussi des arcs-en-ciel, mais les teintes en sont faibles et sans éclat.

1537. C'est à Descartes qu'on doit l'explication de l'arc-en-ciel, c'est lui, qui le premier, détermina par le calcul la marche des rayons à travers une goutte d'eau, reconnut et détermina la position des rayons efficaces; mais, comme alors il ignorait l'inégale réfrangibilité des rayons différemment colorés, il ramena le phénomène de la coloration à ceux qui se produisent dans le prisme; enfin, il vérifia sa théorie par des expériences directes, en faisant arriver des rayons lumineux dans une chambre obscure sur une sphère de verre pleine d'eau.

1538. *Couronnes.* On désigne sous le nom de couronnes des cercles concentriques au soleil ou à la lune, au nombre de 3 ou 4, dont le diamètre intérieur du plus petit varie de 1°,5 à 4°; dans tous ces cercles le rouge est extérieur et le violet en dedans. En les observant avec des verres de couleur, Yong a reconnu que les diamètres croissent comme les nombres 1, 2, 3, 4, etc.; cette loi a été vérifiée récemment par M. Delezène et par M. Babinet. La variation des diamètres des anneaux de même rang et de même teinte dans différentes couronnes, et les lois que suivent les diamètres des anneaux de même couleur dans une même couronne,

ne permettent pas de douter que ces phénomènes ne soient de même nature que les anneaux qu'on observe en regardant une lumière à travers un verre couvert de lycopode, et qu'ils ne soient produits par de petits globules d'eau d'un diamètre uniforme.

1539. *Halos.* On désigne sous le nom de *halos* deux anneaux colorés intérieurement en rouge, concentriques au soleil, et dont les demi-diamètres apparents sont de 22° et 44°. Mariotte avait supposé que, quand les halos se formaient, il existait dans l'atmosphère une multitude de petits prismes de glace, disposés dans toutes les directions possibles, dont les faces étaient inclinées de 60°; alors, il y en avait qui se trouvaient placés de manière que les rayons solaires qui les traversaient arrivaient à l'œil sous la déviation minimum : ces rayons analogues aux rayons efficaces de l'arc-en-ciel produisaient le premier halos. On trouve, en effet, que son demi-diamètre apparent est de 22°, et que le rouge est en dedans, conformément à l'expérience. M. Arago a fait une nouvelle vérification de l'hypothèse de Mariotte, qui la rend bien plus probable encore. Si le cercle coloré provient réellement de réfraction à travers des prismes dont la section principale passe par le soleil, la lumière émergente doit être polarisée partiellement et dans un plan perpendiculaire au rayon du cercle : or l'expérience a parfaitement confirmé cette indication de la théorie.

D'après Cavendish, les prismes de glace sont terminés par des faces perpendiculaires aux arêtes, et le halos extérieur provient de la réfraction minimum entre les faces latérales et les bases. En partant de cette hypothèse, on trouve pour le diamètre du halos un nombre peu différent de celui qui résulte de l'observation.

M. Brewster a produit artificiellement des cercles colorés jouissant de toutes les propriétés des halos, en regardant une lumière à travers une plaque de verre, sur laquelle il avait fait cristalliser une couche mince de dissolution d'alun.

1540. *Parhélies.* Les halos sont quelquefois accompagnés d'un cercle blanc horizontal passant par le soleil, et ayant pour largeur son diamètre apparent; sur la circonférence de ce cercle et un peu en dehors du halos, se trouvent des images colorées du soleil; sur le même cercle horizontal et au point opposé à celui qu'occupe le soleil, on aperçoit une image de cet astre (*anthélie*); il se produit aussi quelquefois une bande blanche verticale qui passe par le soleil, et qui, avec le cercle horizontal, forme une croix blanche; enfin, on voit encore dans les points des halos les plus voisins

de la verticale de l'observateur des arcs de cercles colorés adossés aux halos, et dont les centres sont en dehors. Ce phénomène, dans toute sa complication, ne se montre que rarement. M. Babinet en a expliqué la plupart des particularités, en suivant l'hypothèse de Mariotte.

Admettons l'existence des prismes de glace dans l'atmosphère. Ceux dont l'axe sera allongé devront tomber de manière que leurs arêtes soient verticales, à cause de la résistance de l'air; ceux, au contraire, qui seront très-aplatis tomberont en ayant les faces des bases verticales : ainsi un grand nombre auront des faces verticales. Mais ces faces réfléchiront la lumière du soleil, et les images seront toutes dans un plan horizontal passant par le centre du soleil, et situées à la même hauteur au-dessus de l'horizon : ainsi, l'observateur verra un cercle blanc horizontal passant par le soleil, et ayant son diamètre pour épaisseur. M. Babinet a réalisé le phénomène dont il est question en regardant une lumière avec un cristal fibreux (topaze, tourmaline, diopside, gypse, etc.), taillé parallèlement aux fibres. On aperçoit un cercle lumineux passant par l'image du point lumineux, perpendiculairement aux fibres, et dont le diamètre est d'autant plus grand que le cristal est plus incliné sur la direction du faisceau de lumière. Si, au moyen d'un bel échantillon de cristal fibreux, on regarde l'image du soleil transmise par un prisme placé devant le cristal, on obtient des anneaux colorés d'un grand éclat.

M. Babinet regarde les parhélies latéraux comme provenant des rayons qui ont éprouvé le minimum de déviation dans des prismes verticaux, qui sont plus nombreux dans cette position que dans toute autre, et explique ainsi pourquoi les écarts des parhélies sont d'autant plus éloignés du halos de 22° que l'astre est plus élevé au-dessus de l'horizon, attendu qu'à mesure que le soleil s'élève, la réfraction minimum est plus oblique à la section principale, et par suite plus grande.

Le même physicien attribue la bande blanche verticale qui passe par le soleil à des prismes de glace de peu de hauteur, dont l'axe devient horizontal à cause de la résistance de l'air : alors les prismes dont l'axe sera en même temps perpendiculaire au plan vertical qui passe par l'observateur et le soleil réfléchiront des images qui formeront une bande verticale lumineuse passant par le soleil (*C. R.*, t. IV, p. 638). Les cercles tangents et l'image du soleil sur le point opposé du cercle horizontal n'ont point encore été expliqués.

1541. *Aurore boréale.* L'aurore boréale apparaît à l'horizon du côté du nord, en tirant un peu vers l'ouest, trois ou quatre heures après le coucher du soleil. Elle s'annonce d'abord par une espèce de brouillard, sous la forme d'un segment de cercle dont la corde s'appuie sur l'horizon; les contours du segment paraissent bientôt bordés d'arcs concentriques lumineux, séparés par des bandes obscures. La partie obscure du segment lance des jets de lumière qui se renouvellent avec une extrême rapidité, et se dirigent vers le zénith, où ils forment une couronne enflammée : le phénomène a alors acquis son plus grand éclat; il diminue ensuite graduellement, les jets de lumière deviennent plus rares, la lumière se concentre vers le nord, et enfin disparaît. La lumière des aurores boréales n'a pas toujours le même éclat; elle s'affaiblit quelquefois pendant des heures entières de manière à devenir à peine visible, puis elle augmente subitement. La lumière est diffuse, et a beaucoup d'analogie avec celle de l'électricité dans le vide. Les aurores boréales sont d'autant plus brillantes, qu'on s'approche davantage des pôles : dans les îles Schetland, en Laponie, dans la Sibérie, elles ont beaucoup d'éclat. Ce singulier phénomène paraît être lié au magnétisme terrestre : car on a observé 1° que le centre des arcs concentriques était sur le méridien magnétique; 2° que le point où les rayons lumineux partis de l'horizon se réunissent est précisément celui vers lequel se dirige l'aiguille d'inclinaison; 3° que l'aurore boréale agit sur l'aiguille aimantée, même quand elle n'est pas visible dans le lieu où se trouve l'aiguille. M. Arago a démontré ce fait par un grand nombre d'observations, et il doit être rangé parmi les faits les mieux établis. Quelques physiciens ont nié l'influence observée par M. Arago; mais les expériences sur lesquelles ils se fondaient avaient été faites dans des lieux où les anomalies journalières de l'aiguille ne permettaient pas d'apprécier les perturbations dont il est question. Plusieurs physiciens ont essayé de donner une explication des aurores boréales, mais aucune n'est satisfaisante.

1542. *Étoiles filantes. Aérolithes.* On désigne sous le nom d'*étoiles filantes*, des points lumineux qui se meuvent rapidement dans l'atmosphère en laissant une longue traînée de lumière semblable à celle des fusées à baguettes. Des observations simultanées, faites en 1823 dans plusieurs villes d'Allemagne, semblent indiquer que certaines étoiles filantes se trouvent à plus de 200 lieues au-dessus de la surface de la terre, et que leur vitesse, ordinaire-

ment opposée au mouvement de translation de la terre dans son orbite, s'élève quelquefois à 12 lieues par seconde; enfin un grand nombre d'apparitions d'étoiles filantes ont eu lieu en différents points de la terre, dans différentes années, du 11 au 13 novembre.

Les *aérolithes* sont des masses caverneuses, vitrifiées à leur surface, d'un volume plus ou moins considérable, qui se précipitent de l'atmosphère. Les observations de chutes d'aérolithes sont tellement nombreuses qu'il est impossible de conserver le moindre doute sur ce fait.

On a trouvé à la surface de la terre des masses isolées dont la composition chimique a la plus grande analogie avec celle des aérolithes, et qu'on regarde comme ayant la même origine. Ces masses renferment cependant du fer à l'état métallique, tandis que les aérolithes dont on a observé la chute ne contiennent ce métal qu'à l'état d'oxyde; mais on attribue cette différence à celle des masses. On pense que le métal s'est brûlé dans le trajet à travers l'atmosphère, mais que la combustion n'a pu être complète qu'autant que les masses ne dépassaient pas une certaine limite.

On regarde comme très-probable que les étoiles filantes sont des aérolithes qui s'enflamment dans l'atmosphère. Quant à l'origine même des aérolithes, tout porte à croire qu'un grand nombre de petits corps circulent autour du soleil comme les planètes, qu'il en existe un groupe, dont l'orbite traverse celle de la terre au point où se trouve cette planète, du 11 au 13 novembre, et que ces corps ne deviennent visibles que quand ils pénètrent dans l'atmosphère de la terre, où ils s'enflamment.

1543. *Polarisation de la lumière du ciel.* M. Arago a découvert que la lumière bleue du ciel est en partie polarisée. La lumière qui a traversé un nuage n'est pas polarisée quand l'observateur est dans le nuage; mais quand il est en dehors, elle l'est sensiblement; une épaisseur d'air de 50^{m} est suffisante pour produire cet effet. Quand on observe la polarisation du ciel dans le plan vertical qui contient le soleil, on trouve que la polarisation augmente jusqu'à une certaine limite; au delà, la quantité de lumière polarisée diminue, finit par disparaître, et enfin change de signe en augmentant progressivement. Le point de nulle polarisation ne dépend pas seulement du lieu du soleil, mais encore de l'état du ciel, et la présence de quelques nuages suffit pour le déplacer notablement.

M. Babinet a observé un autre point neutre placé au-dessus du

soleil quand il est près de l'horizon, à peu près à la même hauteur que celui qui a été découvert par M. Arago, et il a constaté qu'après le coucher du soleil le point neutre opposé à cet astre monte considérablement dans l'atmosphère, tandis que celui qui se trouve au-dessus de lui s'abaisse sensiblement, mais bien moins cependant que l'autre ne s'élève.

M. Brewster a confirmé les observations de M. Arago et celle de M. Babinet, et a découvert un troisième point neutre au-dessous du soleil, à 7 ou 8° quand le soleil est à une grande hauteur (*C. R.*, t. XX et XXIII).

La polarisation de la lumière du ciel et les points neutres qu'on a observés paraissent provenir des réflexions multiples de la lumière par l'air.

La lumière de la lune contient une assez grande quantité de lumière polarisée; on s'en assure facilement en faisant les observations dans le premier quartier.

La polarisation du ciel peut se reconnaître facilement à l'aide de tous les corps qui jouissent de la propriété de colorer la lumière polarisée. On peut employer le polariscope de Savart décrit au n° 1504, un cristal biréfringent, un prisme de Nicol, ou les verres noirs de M. Delezène, au devant desquels on place un cristal de quartz, perpendiculaire à l'axe, ou une plaque de verre trempée. Ces appareils font reconnaître l'existence de la lumière polarisée, mais n'en donnent pas une mesure.

1544. M. Arago a imaginé plusieurs appareils destinés à la photométrie, à la mesure de la polarisation de la lumière du ciel et à celle de sa teinte; mais ces appareils ont été décrits trop succinctement pour que nous puissions les indiquer; il serait d'ailleurs peu convenable d'en parler avant que leur savant auteur en ait publié lui-même la description et l'usage (*C. R.*, t. XX et XXI).

Nous rapporterons ici quelques applications remarquables de la polarisation.

MM. Arago et Fresnel ont démontré par une expérience très-remarquable, que l'air humide a une puissance réfractive plus petite que l'air sec. « Deux tubes de cuivre mince, d'environ un mètre de longueur, furent soudés l'un à l'autre comme les deux canons d'un fusil à deux coups. A chaque extrémité, les deux tubes étaient fermés par une seule et même plaque de verre à faces parallèles; des robinets donnaient passage aux substances dont on voulait étudier les effets; quand les deux tubes renfermaient de l'air de

même densité, de la même température et du même degré d'humidité, le faisceau qui traversait le tube de droite produisait, en se mêlant à sa sortie au faisceau provenant du tube de gauche, des franges irisées dont la place coïncidait presque exactement avec celle des franges qui résultaient de l'action de ces mêmes faisceaux se propageant dans l'air libre. Si la force élastique, étant toujours égale dans les deux tubes, l'un renfermait du chlorure de calcium et l'autre de l'eau; si, dès lors, le premier tube était rempli d'air complétement sec, et le second d'air saturé d'humidité, les bandes formées par l'interférence du faisceau qui, dans sa course, traversait un mètre d'air humide, et du faisceau qui traversait un mètre d'air sec, n'occupait plus la place des franges engendrées à l'air libre, l'interposition des tubes produisait un déplacement notable, un déplacement d'une frange et demie. Ce déplacement se faisait toujours du côté de l'air sec; ainsi l'air sec a une plus grande puissance réfringente que l'air humide. A + 27°, les indices de l'air sec étaient de 1,0002745, et pour l'air humide de 1,0002936. On voit, par ces nombres, le degré de précision de ce mode d'expérience. » Il présentait cependant une cause d'incertitude que, plus tard, M. Arago est parvenu à faire disparaître : on pouvait supposer que le déplacement des franges était produit par une légère couche d'eau déposée sur les surfaces de verre fermant le tube plein d'air humide qui masquait en grande partie l'effet cherché. M. Arago a fait l'expérience en employant des tubes d'un centimètre de longueur, et il n'a obtenu qu'une déviation inappréciable.

M. Arago a indiqué une application très-singulière du principe dont nous venons de parler. Si l'on emploie un seul tube vide fermé par deux glaces, et à côté d'une des extrémités une lame de glace qui compense exactement les effets produits par les deux premières et par une colonne d'air de la longueur du tube dans un certain état de pression, de température et d'état hygrométrique; quand la puissance réfractive de l'air changera, les franges seront portées à droite ou à gauche, et, comme la puissance réfractive de l'air est liée à sa température et à sa force élastique, le déplacement des franges pourrait être employé pour déterminer la température ou la pression de l'air, quand l'un de ces deux éléments sera connu. M. Arago estime qu'on pourrait ainsi déterminer la température à 1/20 de degré, ou la pression à un ou deux dixièmes de millimètre (*C. R.*, t. x).

On doit encore à M. Arago cette remarque importante. En mer,

à une certaine distance, les écueils ne sont point aperçus par les marins, malgré la transparence des eaux, parce que les rayons qu'ils émettent sous une grande inclinaison éprouvent, par la réflexion à la surface des eaux, une perte considérable, et surtout à cause de la grande intensité des rayons réfléchis à la surface extérieure de l'eau; mais, comme ces rayons sont en grande partie polarisés dans le plan d'incidence, on conçoit que, si l'on reçoit la lumière à travers une plaque de tourmaline dont la section principale est parallèle au plan d'incidence, presque tous les rayons réfléchis seront absorbés, et l'écueil deviendra visible.

§ 12. *Sources de la lumière.*

1545. Parmi les corps célestes, il n'y a que le soleil et les étoiles qui soient lumineux par eux-mêmes; les planètes ne le sont que par réflexion. La lumière que la terre reçoit du soleil est beaucoup plus grande que celle qu'elle reçoit des étoiles, probablement à cause de sa proximité comparée à celle de ces dernières. Mais, indépendamment des sources de lumière dont nous venons de parler et qui paraissent permanentes, il en existe encore deux autres que nous sommes libres de produire à volonté : c'est l'électricité et une température très-élevée. Nous avons déjà suffisamment parlé de la première, nous donnerons seulement quelques détails sur la seconde.

1546. Il paraît qu'en général, toutes les fois que la température d'un corps dépasse 500°, il devient lumineux. Ce phénomène tendrait à faire penser que la lumière et la chaleur sont le résultat des vibrations d'un seul et même fluide, mais beaucoup plus rapides pour la lumière que pour la chaleur, et que certaines circonstances peuvent augmenter ou diminuer la rapidité des vibrations, et transformer la chaleur en lumière et la lumière en chaleur obscure. Quoi qu'il en soit, il résulte du fait que nous avons énoncé, que tous les moyens artificiels propres à dégager de la chaleur, lorsqu'ils pourront atteindre ou dépasser la limite de température que nous avons assignée, produiront en même temps un dégagement de lumière. Ainsi, le frottement, le choc et les actions chimiques sont aussi des sources de lumière. Parmi les actions chimiques, la combustion est la seule que l'on emploie pour produire de la lumière artificielle; nous donnerons ici quelques détails sur les appareils d'éclairage.

Les corps qui sont fixes, c'est-à-dire qui, aux températures que nous pouvons produire, conservent l'état liquide ou solide, ne développent que peu de lumière par leur combustion dans l'air, même quand les produits de la combustion sont volatils; mais les gaz en produisent beaucoup quand ils tiennent en suspension des corps solides très-divisés. L'hydrogène carboné est dans ce cas, parce qu'une partie du carbone qu'il contient se dépose par la chaleur : ce gaz est réellement, comme nous allons le voir, le seul corps combustible employé pour produire de la lumière : tantôt il se forme dans les appareils mêmes de combustion, tantôt on le produit d'avance dans des appareils particuliers, d'où il est conduit dans les lieux où il doit être brûlé.

Les corps dont on se sert pour l'éclairage sont les matières grasses végétales ou animales, et le gaz hydrogène carboné provenant de la distillation de la houille, des huiles ou des résines. Quand les matières sont solides, on en forme des cylindres dont l'axe est occupé par une matière solide très-poreuse, qu'on nomme mèche; lorsque la mèche est enflammée, elle fond la matière solide à une distance plus ou moins considérable, la matière liquéfiée monte dans la mèche par la capillarité, se décompose par la chaleur qu'elle y éprouve, et donne naissance à un dégagement de gaz hydrogène carboné, qui, en brûlant, produit la flamme. On peut observer ce dégagement de gaz en éteignant la flamme d'une bougie, de manière que l'extrémité de la mèche reste encore incandescente : on aperçoit une fumée blanche très-combustible. Dans les lampes alimentées par des matières liquides, l'huile s'élève dans la mèche, y éprouve la même décomposition qui produit le même effet.

Les lampes dont on se servait autrefois pour brûler les huiles, se composaient simplement d'un réservoir, dans lequel plongeait la partie inférieure de la mèche; mais elles avaient l'inconvénient de ne pas brûler la totalité des gaz qui se dégagent, et, par conséquent, de donner de la fumée, souvent d'une odeur désagréable, de consommer infructueusement une partie de la matière combustible, et de ne produire que des foyers d'une faible intensité. Argand est parvenu, au moyen d'une disposition très-simple, et maintenant généralement usitée, à faire disparaître complétement ces inconvénients. Les becs des lampes d'Argand sont formés de deux tuyaux cylindriques concentriques; l'intervalle qui les sépare, fermé inférieurement, communique avec le réservoir d'huile; dans cet intervalle,

on place une mèche circulaire qui monte ou descend à l'aide d'une crémaillère; le courant d'air arrive et par le cylindre intérieur et autour du cylindre extérieur. On conçoit que, par cette disposition, la flamme étant très-mince et enveloppée par deux courants d'air, la combustion doit être plus complète; en outre, elle est rendue beaucoup plus vive au moyen de la cheminée de verre qui entoure la flamme : le courant d'air devient plus rapide par le tirage qu'elle produit, et le coude que présente la cheminée, en réfléchissant de la chaleur sur la flamme elle-même, contribue à favoriser la combustion. Quand les proportions du bec, la distance du niveau de l'huile dans le réservoir à l'extrémité du bec, celle de l'extrémité de la mèche au coude de la cheminée, et la hauteur de la cheminée, sont convenables, la combustion a lieu à distance du sommet du bec; elle ne donne aucune fumée et produit le maximum de lumière que l'on peut obtenir de l'huile consommée. La mèche et la cheminée pouvant se mouvoir facilement, on peut toujours les placer de la manière la plus avantageuse. Dans les appareils où l'une quelconque de ces conditions n'est pas remplie, au bout d'un certain temps, la mèche se charbonne, il se dégage de la fumée et la lumière diminue. Les réservoirs à niveau constant et les lampes hydrostatiques, que nous avons décrits dans le premier volume, satisfont parfaitement à la condition de la permanence de hauteur de l'huile dans le bec. Dans les lampes de Carcel, l'huile est sans cesse injectée dans la mèche par de petites pompes placées dans le pied de la lampe, et qui sont mues par un mouvement d'horlogerie que l'on remonte tous les jours. Ces lampes sont supérieures à toutes les autres.

Pour l'éclairage des rues, des théâtres, des cafés, des boutiques, on se sert maintenant du gaz hydrogène carboné qui provient de la distillation de la houille, du goudron et des matières grasses. La houille est presque uniquement employée à cet objet, non-seulement parce qu'elle est d'un prix très-peu élevé, relativement aux autres matières dont on pourrait faire usage, mais parce que les résidus de la distillation, le coke, et les produits liquides, le goudron et les eaux ammoniacales, ont une valeur qui compense presque le prix de la houille consommée. La houille est placée dans des cylindres de fonte qu'on maintient à la chaleur rouge; les matières vaporisées se dégagent par des tubes de fonte, qui communiquent avec d'autres, rangés parallèlement, placés dans l'air libre ou dans l'eau, où les gaz et les vapeurs se refroidissent;

ces dernières sont liquéfiées et s'écoulent dans des réservoirs convenablement disposés. Les gaz se rendent sous de grandes cloches en tôle équilibrées par des contre-poids, et plongeant par leur partie inférieure dans l'eau; ces cloches, qui sont réellement des magasins de gaz, portent le nom impropre de gazomètres; il en existe une dans une usine de Paris qui a 50 mètres de diamètre. Avant d'arriver au gazomètre, le gaz doit être séparé des hydrosulfures qu'il contient, et qui, dans leur combustion, produiraient de l'acide sulfureux. Cette purification s'effectue ordinairement en faisant passer le gaz dans de grands cylindres verticaux en tôle, renfermant plusieurs diaphragmes horizontaux percés d'un grand nombre de petits trous, couverts de mousse, sur laquelle on a placé une couche plus ou moins épaisse de chaux éteinte. Au-dessous du gazomètre, se trouvent deux tubes dont les extrémités dépassent le niveau de l'eau : l'un amène le gaz, dégagé des cornues, après le refroidissement et l'épuration; l'autre communique à des tuyaux de fonte placés sous le pavé des rues, et sur lesquels se trouvent des tuyaux d'embranchement d'un plus petit diamètre, qui aboutissent aux becs de combustion. A l'origine, le tuyau d'écoulement est garni d'un large robinet qui reste fermé pendant le jour. Les becs sont souvent formés de deux cylindres concentriques, fermés aux deux bouts, recevant le gaz par le bas et le laissant écouler par un grand nombre d'orifices très-petits percés dans le fond annulaire supérieur; ces becs sont environnés d'une cheminée; ils ont la plus grande analogie avec ceux d'Argant. Pour l'éclairage des rues, le gaz se dégage par une fente très-étroite, pratiquée dans la partie supérieure d'une petite sphère métallique, qui reçoit le gaz par la partie inférieure : ces becs sont sans cheminée.

Lorsque la lumière doit être portée sur une certaine étendue, on emploie des miroirs disposés de manière à diriger sur cet espace celle qui se disséminerait dans toute autre direction. Quand la lumière doit franchir une grande distance, on rend les rayons parallèles par des miroirs ou des lentilles [1351].

1547. Il existe un grand nombre de corps qui émettent de la lumière dans des circonstances particulières, sans que cette émission de lumière soit accompagnée de la haute température que développe la combustion. Cette lumière, qui a beaucoup d'analogie avec celle de l'électricité, et surtout avec celle que produit la combustion lente du phosphore, a été désignée sous le nom de *lumière phosphorique*.

Certains corps peuvent devenir phosphorescents par la chaleur, l'insolation, le frottement, la percussion, et les décharges électriques; d'autres sont naturellement phosphorescents.

Lorsque les corps sont naturellement phosphorescents, et que, s'ils sont organiques, ils n'appartiennent point à des corps vivants, par exemple, le phosphore, les bois et les poissons dans un certain état de décomposition, la phosphorescence paraît due à des actions chimiques lentes.

Plusieurs insectes, principalement le *lampyre*, jouissent de la propriété d'émettre de la lumière dans l'obscurité. La lumière du lampyre ne se manifeste point quand l'animal a été renfermé dans un lieu obscur; lorsqu'on le chauffe graduellement, l'intensité de la lumière augmente progressivement jusqu'à 41°, et subsiste après la mort de l'animal; en le jetant dans l'eau à 50°, il meurt aussitôt, et produit beaucoup de lumière. La phosphorescence de la mer dans certaines localités paraît due à la présence d'un grand nombre de petits animalcules phosphoriques, et à des débris de matières organiques dans un certain état de décomposition.

§ 13. *Explication des phénomènes dans le système de l'émission.*

1548. Newton admettait, comme nous l'avons déjà dit, que les corps lumineux lancent dans toutes les directions des molécules d'une ténuité extrême : un rayon de lumière est alors composé d'une suite de molécules qui se meuvent avec une égale vitesse suivant la même direction, et la vitesse de chaque molécule est égale à la vitesse réelle de la lumière. Ces molécules doivent être d'une ténuité excessive pour que leur choc, malgré leur énorme vitesse, ne blesse pas l'organe si délicat de la vision.

1549. Dans ce système, un rayon lumineux étant formé d'une série de molécules qui se meuvent en ligne droite avec la même vitesse, elles doivent être assez rapprochées pour tenir la rétine dans un état d'excitation permanente. Or, on peut facilement reconnaître par l'expérience que, pour obtenir une sensation continue, il suffit que la cause excitatrice se renouvelle huit à dix fois par seconde : alors l'effet produit à chaque apparition dure un temps plus long que celui qui la sépare de la suivante. On conçoit d'après cela que, pour produire un effet permanent, les molécules lumineuses qui constituent un même rayon peuvent être très-éloignées les unes des autres, et l'être inégalement, car il suffit qu'elles

se succèdent à des intervalles plus petits que 1/10 de seconde : or, comme la lumière parcourt 70000 lieues par seconde, la continuité de la sensation exigerait que leur distance ne dépassât pas 7000 lieues. On voit, par là, comment les rayons de lumière peuvent se croiser dans toutes sortes de directions sans se troubler dans leur marche.

De tous les physiciens qui ont adopté le système de l'émission, nul ne l'a étudié avec plus de détails et ne l'a suivi plus loin dans ses conséquences mathématiques que M. Biot, non-seulement pour les phénomènes qui étaient connus du temps de Newton, mais pour ceux qui ont été découverts depuis. Le système de l'émission est exposé de la manière la plus complète dans le grand traité de physique de ce célèbre physicien. Nous n'entrerons dans quelques détails à ce sujet que pour la réflexion et la réfraction, les seuls phénomènes qui s'expliquent, en apparence du moins, d'une manière satisfaisante dans ce système, et en prenant pour guide l'ouvrage que nous venons de citer.

1550. Dans le système de l'émission, l'ombre géométrique formée sur les corps, celle qu'ils projettent derrière eux, les pénombres et le décroissement de l'intensité de la lumière, s'expliquent avec une extrême facilité.

1551. *Réflexion et réfraction.* Pour expliquer toutes les modifications que les corps font éprouver à la lumière, Newton admet que les molécules lumineuses éprouvent de la part des corps des actions qui ne se manifestent qu'à une très-petite distance, et dont les intensités et la nature varient suivant la nature du corps et les circonstances physiques dans lesquelles se trouvent les molécules lumineuses : les unes éprouvent une action répulsive, et peuvent être réfléchies quand la force répulsive est suffisante pour détruire la composante normale de la vitesse d'impulsion; les autres sont attirées et nécessairement transmises.

1552. Soient AB (fig. 911) une surface réfléchissante, m une molécule lumineuse, sur laquelle le corps AB exerce une force répulsive qui ne se manifeste qu'à une distance insensible. Si du point m, comme centre, on décrit une sphère avec un rayon égal à la distance d'action sensible, la molécule m sera repoussée par toutes les molécules du corps réflecteur renfermées dans cette sphère; cette dernière ayant un rayon infiniment petit, on pourra considérer la partie de la surface qui agit sur la molécule lumineuse pendant son mouvement comme étant plane. Alors, l'intensité de

la force répulsive dépendant seulement de la distance, et la masse répulsive étant symétrique par rapport à la normale, la résultante totale des répulsions de toutes les molécules matérielles passera par la normale; et, comme cette normale ne changera pas sensiblement de direction par le déplacement de la molécule lumineuse, et que la même chose aura lieu tant qu'elle sera à une distance des bords du corps plus grande que la distance d'action sensible, il s'ensuit évidemment, que le rayon lumineux, dans sa marche, ne sortira pas du plan normal à la surface passant par le rayon incident, puisque ce plan renferme toutes les forces qui agissent : c'est la première loi de la réflexion.

Pour découvrir la seconde, considérons un rayon de lumière MN (fig. 912) arrivant sur une surface AB, sous l'incidence θ, et soit ab la limite de la distance à laquelle s'étendent les forces répulsives. Décomposons au point N la vitesse du rayon lumineux en deux autres, l'une dirigée suivant la normale, et que nous désignerons par v, l'autre parallèlement à AB, que nous désignerons par h. La résultante des forces émanées de AB étant verticale, la première vitesse seule sera altérée pendant que le rayon se rapprochera de AB, et la vitesse horizontale h restera constante; à mesure que la molécule lumineuse pénétrera dans l'espace ABab, sa vitesse verticale devenant de plus en plus petite, la direction du rayon s'inclinera toujours davantage sur AB, et il arrivera une époque où elle sera parallèle à AB; alors la vitesse verticale sera nulle. A partir de cet instant, les forces répulsives, agissant toujours dans le même sens, rendront à la molécule lumineuse une vitesse verticale en sens contraire, qui croîtra de telle manière, qu'à des distances égales de AB les vitesses verticales deviendront les mêmes. Il suit nécessairement de là, que la trajectoire curviligne NN' sera symétrique par rapport à la normale xy, et, comme les composantes horizontales et verticales de la molécule aux points N et N' sont égales, il en résulte que les rayons incidents et réfléchis sont également inclinés sur la normale. Il faut remarquer que, dans ce système, le rayon pourrait pénétrer dans le corps à une certaine profondeur et être encore réfléchi. En effet, soit $a'b'$ (fig. 913) une surface intérieure, distante de la surface AB d'une quantité égale à la distance de répulsion sensible; soit m une molécule lumineuse qui a traversé la surface AB : tant que cette molécule n'aura pas atteint $a'b'$, elle éprouvera une action répulsive, car, si l'on décrit autour d'elle la sphère de répulsion sensible, il est évident

que les forces répulsives des parties x et y se détruisent, et qu'il reste celles de la partie z. Ainsi les forces répulsives se manifestent depuis la limite extérieure ab jusqu'à la limite intérieure $a'b'$; mais elles croissent de ab jusqu'à AB, et décroissent de AB à $a'b'$, et une molécule peut être réfléchie dans tout l'espace compris entre ces limites. Il est évident, d'après ce qui précède, que, pour le même corps, la réflexion aura lieu à une distance de $a'b'$ d'autant plus grande que le rayon sera plus incliné sur la surface, car alors les forces répulsives ont une plus petite composante verticale à détruire.

Dans ce système, on conçoit facilement pourquoi la réflexion est d'autant plus abondante que les rayons sont plus inclinés, parce que les composantes verticales que les forces répulsives doivent détruire sont d'autant plus petites que les rayons sont plus inclinés. On rend facilement compte aussi de la réflexion régulière que produisent les corps dépolis sur les rayons très-inclinés : c'est qu'alors la réflexion a lieu près de la limite extérieure, que les sommets seuls des aspérités agissent, et qu'étant dirigés dans le même plan ils agissent comme un plan continu.

1553. Pour expliquer la réfraction, Newton admet, comme nous l'avons déjà dit, que les corps réfringents exercent sur certaines molécules de la lumière une attraction qui ne se manifeste qu'à des distances extrêmement petites, et qui croît à mesure que la distance diminue, suivant une loi quelconque, comme les forces répulsives, qui, s'exerçant sur d'autres molécules, produisent la réflexion. Par les mêmes raisonnements que nous avons faits pour la réflexion, on trouve que la résultante de ces forces est toujours normale à la surface, du moins tant que la molécule lumineuse est à une distance sensible des bords du corps, et que ces forces doivent se manifester sur une molécule lumineuse dans l'espace $aba'b'$ (fig. 914), ab et $a'b'$ étant des surfaces parallèles à AB, et distantes de cette dernière d'une quantité égale à la distance d'attraction sensible. Il résulte de là, que le rayon incident dans sa marche ne doit pas sortir du plan normal à la surface qui passe par sa direction, puisque ce plan renferme toutes les forces qui sollicitent les molécules lumineuses; et que leurs trajectoires ne sont curvilignes que dans l'espace $aba'b'$, au delà duquel elles continuent à se mouvoir en ligne droite et avec une vitesse constante; c'est la première loi de la réfraction. Quant à la permanence de l'indice de réfraction, on la déduit facilement de ce que la vitesse du rayon lumineux est con-

stante avant son entrée dans la surface ab et après sa sortie de la surface $a'b'$, et de ce que les forces réfractives n'altèrent point la composante horizontale de la vitesse du rayon. En effet, soient v la vitesse primitive du rayon lumineux, et h la composante horizontale, V la vitesse du rayon dans le corps, après qu'il a traversé la surface $a'b'$, h' sa composante horizontale, et enfin θ et θ' les angles d'incidence et de réfraction, on a évidemment $h = v \sin\theta$, et $h' = V \sin\theta'$; et puisque les composantes horizontales du rayon incident et du rayon réfracté sont égales, on a $\frac{\sin\theta}{\sin\theta'} = \frac{V}{v}$. Ainsi l'indice de réfraction est constant, et égal au rapport des vitesses de la lumière dans le corps et dans le vide. En poursuivant l'hypothèse de l'attraction des corps sur les molécules de la lumière, le calcul conduit aux circonstances les plus minutieuses des phénomènes observés.

1554. Supposons qu'un point m, se mouvant avec une vitesse u, soit soumis à une force accélératrice analogue à la pesanteur et dirigée dans le même sens : en désignant par g le double de l'espace parcouru pendant l'unité de temps, par v la vitesse après le temps t, par e l'espace parcouru pendant le même temps, nous aurons

$$v = u + gt, \quad \text{et} \quad e = ut + \frac{gt^2}{2}.$$

Substituant dans la seconde équation la valeur t tirée de la première, il vient

$$v^2 = u^2 + 2ge.$$

Si la force accélératrice n'était pas constante, c'est-à-dire si ses actions successives n'étaient pas égales, on pourrait toujours diviser l'espace que doit parcourir le point m sous son influence, en un grand nombre de parties assez petites, pour que l'on pût regarder la force accélératrice comme constante pendant qu'il traverse chacune d'elles : en appelant v' la vitesse à la fin de la seconde tranche, v'' la vitesse à la fin de la troisième, etc., V la vitesse finale, e l'épaisseur commune de ces tranches, et g, g', g'', etc., les intensités des forces accélératrices correspondantes à chacune d'elles, on aurait

$$\begin{aligned} v^2 - u^2 &= 2ge, \\ v'^2 - v^2 &= 2g'e, \\ v''^2 - v'^2 &= 2g''e \ldots \\ V^2 - v^{(n-1)2} &= 2g^{(n)}e. \end{aligned}$$

Ajoutant toutes ces équations, il vient

$$V^2 = u^2 + 2ge + 2g'e + 2g''e + \ldots$$

Supposons maintenant qu'une molécule lumineuse, se mouvant dans le vide

avec une vitesse u, se présente à la surface d'un corps sous un angle θ. Désignons par θ' l'angle de réfraction, et par V la vitesse de la lumière dans le corps, la vitesse horizontale sera toujours

$$u \sin \theta ;$$

et le carré de la vitesse verticale, qui, à l'entrée dans la limite supérieure, était $u^2 \cos^2 \theta$, sera à la surface même du corps

$$u^2 \cos^2 \theta + 2ge + 2g'e + 2g''e \ldots.$$

et à la limite inférieure elle sera donnée par l'équation

$$V^2 \cos^2 \theta' = u^2 \cos^2 \theta + 2\,[2ge + 2g'e + g''e + \ldots\,];$$

car les valeurs de g, g', g'' sont les mêmes à des distances égales de la surface du corps, en dehors et en dedans. Si nous désignons par δ la densité du corps, par k un coefficient constant, nous pourrons poser

$$2ge + 2g'e + 2g''e + \ldots. = \delta k^2,$$

et il viendra $$V^2 \cos^2 \theta' = u^2 \cos^2 \theta + 2\delta k^2 \ldots. \quad (a).$$

Remarquons maintenant que nous avons pour la vitesse horizontale

$$V \sin \theta' = u \sin \theta ;$$

en élevant cette équation au carré et l'ajoutant avec l'équation (a), il vient

$$V^2 = u^2 + 2\delta k^2.$$

Mais nous avons $$V = nu,$$

donc $$2\delta k^2 = u^2 (n^2 - 1).$$

La quantité $2\delta k^2 : u^2$, qui est proportionnelle à l'action du corps, est ce que Newton a désigné sous le nom de puissance réfractive, et $2k^2 : u^2$ est le pouvoir réfringent.

1555. Si un rayon de lumière se présentait à la seconde surface d'un corps pour sortir dans le vide (fig. 915), les actions émanées du corps agiraient en sens contraire; elles commenceraient à se manifester à la limite intérieure, et s'exerceraient jusqu'à ce que la molécule fût parvenue à la limite extérieure. A cette dernière limite, la vitesse de la molécule serait $v^2 = V^2 - 2\delta k^2$, et l'on trouverait la vitesse de la lumière dans le vide, puisque $2\delta k^2 = V^2 - u^2$.

Mais le rayon pourrait être assez incliné sur la surface d'émergence pour que l'action du corps détruisît la composante de sa vitesse perpendiculaire à la surface du corps, avant que les molécules lumineuses eussent atteint la limite extérieure des forces : alors le rayon rentrerait dans l'intérieur du corps; il éprouverait une véritable réflexion, et il est facile de voir, d'après ce qui précède, que l'angle d'incidence serait égal à l'angle de réflexion. Cette réflexion peut avoir lieu en un point quelconque de l'espace qui sépare les deux surfaces limites. Si l'on suppose que le rayon, d'abord perpendiculaire à la surface AB (fig. 916), s'incline toujours davantage sur cette surface, la réflexion commencera par se manifester sur la surface $a'b'$. A mesure que l'inclinaison

augmentera, la réflexion se fera à une plus petite distance de ab, et quand le rayon sera parallèle à AB, la réflexion aura lieu à la limite intérieure des forces : car, à mesure que l'inclinaison augmente, la composante verticale devient plus petite, et l'action du corps la détruit à des distances plus petites de ab.

L'inclinaison du rayon sous laquelle la réflexion commence est donc déterminée par cette condition, que la composante verticale soit nulle à la limite extrême : or, en désignant comme précédemment par V la vitesse dans l'intérieur du corps, et par θ l'angle du rayon avec la normale à la surface d'émergence, la composante perpendiculaire à cette surface, et à la limite intérieure sera $V\cos\theta$, et, à la limite extérieure $a'b'$, elle sera

$$\sqrt{(V^2\cos^2\theta - 2\delta k^2)}.$$

Alors, pour déterminer les valeurs de θ correspondantes, nous aurons les équations

$$V\cos\theta = 0, \quad \text{et } V^2\cos^2\theta - 2\delta k^2 = 0.$$

La première donne $\theta = 90^0$; pour avoir la valeur de θ, qui satisfait à la seconde, remarquons que $2\delta k^2 = u^2(n^2 - 1)$, u étant la vitesse de la lumière dans le vide, et que $V = nu$; alors il vient

$$\cos^2\theta = \frac{n^2 - 1}{n^2} = 1 - \frac{1}{n^2}; \quad \text{d'où } \sin\theta = \frac{1}{n};$$

ce qui s'accorde avec la valeur de l'angle limite trouvée par l'expérience.

1556. Examinons maintenant le cas où la lumière passerait d'un milieu dans un autre. Soient AB (fig. 917) leur surface de séparation, ab et $a'b'$ deux surfaces éloignées de AB de la distance à laquelle se manifeste l'action des corps sur la lumière. Quand une molécule lumineuse aura passé au delà de la surface ab, elle sera sollicitée par le corps d'où elle tend à sortir, et par celui dans lequel elle tend à pénétrer; mais ces deux actions seront opposées et normales à la surface de séparation : ainsi le rayon réfracté restera dans le plan normal à la surface de séparation des deux milieux et passant par le rayon incident. Si l'on désigne par V et V' les vitesses de la lumière dans le premier et le second milieu, par θ et θ' les angles que font avec la normale le rayon incident et le rayon réfracté, les composantes horizontales des vitesses seront $V\sin\theta$ et $V'\sin\theta'$; et, comme ces vitesses sont égales, on aura

$$\frac{\sin\theta}{\sin\theta'} = \frac{V'}{V}.$$

Or, V' et V étant des quantités constantes, il en résulte que l'indice de réfraction est aussi constant, et qu'il est égal au rapport inverse des vitesses dans les deux milieux. Pour avoir le rapport de ces vitesses, désignons par $2\delta k^2$ l'effet que produirait le premier milieu sur un rayon qui y pénétrerait en sortant du vide, par $2\delta' k'^2$ l'effet analogue produit par le second milieu : on aura

$$V'^2 = V^2 - 2\delta k^2 + 2\delta' k'^2; \quad \text{d'où } \frac{V'^2}{V^2} = 1 - \frac{2\delta k^2 - 2\delta' k'^2}{V^2}.$$

Remarquons maintenant que, u représentant la vitesse de la lumière dans le vide, et n, n', les indices de réfraction pour le vide et chacun des milieux, on a

$$V^2 = u^2 + 2\delta k^2, \quad 2\delta k^2 = u^2(n^2 - 1), \quad \text{et } 2\delta' k'^2 = u^2(n'^2 - 1);$$

alors il vient

$$\frac{V'^2}{V^2} = 1 - \frac{u^2(n^2 - n'^2)}{n^2 u^2} = \frac{n'^2}{n^2}; \quad \text{d'où } \frac{V'}{V} = \frac{n'}{n}.$$

Ainsi l'indice constant de réfraction, pour le passage de la lumière d'un milieu dans un autre, est égal au rapport des indices de réfraction relatifs au vide, au second et au premier milieu.

Pendant que la molécule lumineuse traverse l'espace qui sépare les deux limites ab et ab', la composante de la vitesse perpendiculairement à la surface de séparation des deux milieux croît d'une manière continue de

$$V\cos\theta \quad \text{à} \quad \sqrt{V^2\cos^2\theta - 2\delta k^2 + 2\delta' k'^2}.$$

L'angle θ peut être tel que cette vitesse devienne nulle lorsque la molécule a pénétré à une certaine profondeur au-dessous de la limite ab : alors il est évident que la molécule sera réfléchie vers le premier milieu, de manière que l'angle de réflexion soit égal à l'angle d'incidence, et que la réflexion aura lieu à une distance de ab d'autant plus grande que l'angle θ sera plus petit. Si on suppose que le rayon, d'abord perpendiculaire à la surface de séparation des deux milieux, s'incline vers cette surface, la réflexion commencera à avoir lieu sur la limite extérieure $a'b'$, et l'angle d'incidence du rayon sera déterminé par l'équation

$$V^2\cos^2\theta - 2\delta k^2 + 2\delta' k'^2 = 0.$$

Pour en déduire la valeur de θ, il faut remarquer qu'on a

$$V^2 = u^2 + 2\delta k^2, \quad 2\delta k^2 = u^2(n^2 - 1), \quad \text{et } 2\delta' k'^2 = u^2(n'^2 - 1):$$

alors on trouve

$$\cos^2\theta = 1 - \frac{n'^2}{n^2}; \quad \text{d'où } \sin\theta = \frac{n'}{n}.$$

Mais, si la réflexion avait lieu à la surface de séparation des deux milieux, l'angle d'incidence θ serait donné par l'équation

$$V^2\cos^2\theta - \delta k^2 + \delta' k'^2 = 0;$$

d'où l'on tirerait

$$\cos^2\theta = \frac{n^2 - n'^2}{2n^2}; \qquad \text{et } \sin^2\theta = \frac{n^2 + n'^2}{2n^2}.$$

Quand le second milieu est opaque, on admet que la réflexion ne commence qu'à la surface de séparation des deux milieux, et c'est, par conséquent, cette dernière valeur de θ qu'il faut prendre pour l'angle limite.

1557. *Décomposition de la lumière par réfraction.* Newton admet, comme l'expérience le démontre, que les rayons de lu-

mière blanche sont formés de rayons parallèles de couleur variable et inégalement réfrangibles : il en résulte alors qu'ils sont séparés par tous corps réfringents, mais ne restent séparés, après leur émergence, qu'autant que la surface de sortie n'est point parallèle à la face d'incidence.

1558. *Décomposition de la lumière par des lames minces.* L'explication de ces phénomènes singuliers repose sur la théorie des *accès de facile réflexion et de facile transmission*, que nous allons indiquer.

Newton suppose 1° que toutes les molécules lumineuses reçoivent, à l'instant de leur émission, des dispositions à être facilement réfléchies et réfractées, qui se succèdent alternativement après des temps égaux : or, comme la vitesse de la lumière est uniforme, ces intermittences se succèdent après des chemins parcourus égaux, de sorte que sur la route d'une molécule lumineuse se trouvent des distances égales, entre lesquelles la molécule est successivement dans des dispositions à la réflexion et à la réfraction : ces successions d'état sont désignées sous le nom d'*accès;* la distance parcourue par la molécule entre les retours consécutifs de la même phase de deux accès de même nature s'appelle *intervalle des accès;* ces derniers intervalles sont évidemment doubles de la longueur d'un accès; 2° que chaque molécule lumineuse passe d'une manière continue d'un accès à un autre, par la diminution progressive de la faculté réfléchissante ou réfractive; 3° que la longueur des accès varie, lorsque la lumière passe perpendiculairement d'un corps dans un autre, suivant le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction; 4° que, dans le cas d'une réfraction oblique, les longueurs des accès varient suivant une loi dont il a donné l'expression analytique; 5° que, quand des rayons lumineux se réfléchissent à la seconde surface d'un corps, ils reprennent après la réflexion, et à partir de la surface réfléchissante, de nouveaux accès dont les longueurs sont les mêmes que si, venant du milieu extérieur, ils étaient entrés avec l'obliquité que leur imprime la réflexion; 6° que les accès des rayons varient avec leurs couleurs : ils sont, pour le rayon rouge extrême, pour la limite de l'orangé et du rouge, du jaune et de l'orangé, du vert et du jaune, du bleu et du vert, de l'indigo et du bleu, du violet et de l'indigo, et pour le violet extrême, proportionnels aux racines cubiques des nombres

$$1,\ {}^{8}/_{9},\ {}^{5}/_{6},\ {}^{3}/_{4},\ {}^{2}/_{3},\ {}^{3}/_{5},\ {}^{9}/_{16},\ {}^{1}/_{2}.$$

Au moyen de ces nombreuses hypothèses, toutes calquées sur les lois des phénomènes, on parvient à les expliquer. Nous n'entrerons pas dans tous ces détails, attendu que la théorie de Newton est insuffisante : elle ne rend compte que des phénomènes pour lesquels elle a été faite; tous les autres lui échappent. Nous citerons, par exemple, les anneaux réfléchis à centres blancs (1415).

1559. *Double réfraction et polarisation.* Pour expliquer la double réfraction, on a admis qu'indépendamment des forces réfractives ordinaires qui se manifestent sur toutes les molécules qui pénètrent dans le corps, un certain nombre d'entre elles étaient sollicitées par des forces répulsives ou attractives dirigées perpendiculairement à l'axe du cristal. M. de Laplace, en soumettant cette hypothèse au calcul, en a déduit la construction d'Huyghens, et M. Ampère, en supposant les molécules lumineuses soumises à des forces émanées de plusieurs axes, a été conduit à une construction analogue à celle d'Huyghens, mais beaucoup plus générale.

Quant à la polarisation de la lumière, voici de quelle manière on a essayé d'en rendre compte. Nous avons déjà vu que dans le système de l'émission les différentes faces des molécules ne jouissent pas des mêmes propriétés physiques : les unes sont favorables au développement des forces réfléchissantes, les autres aux forces réfractives. Dans un rayon de lumière naturelle, les molécules sont disposées de toutes les manières possibles, et c'est pourquoi, à la rencontre d'un corps, il y a des molécules réfléchies et d'autres réfractées; mais, comme un rayon polarisé est entièrement absorbé ou entièrement réfléchi dans certaines directions, on a été conduit à admettre que, dans un rayon polarisé, toutes les faces homologues des molécules étaient parallèles.

1560. Pour expliquer la coloration de la lumière polarisée quand elle traverse les lames minces cristallisées, M. Biot suppose que, lorsqu'un faisceau de lumière polarisée traverse un cristal doué de la double réfraction, et dont la section principale n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation, *les axes des molécules lumineuses*, d'abord dirigés suivant ce plan, éprouvent, en pénétrant dans le cristal, des oscillations qui les portent alternativement à droite et à gauche de la section principale, tantôt dans le plan primitif, tantôt dans un plan situé de l'autre côté, à la même distance angulaire. M. Biot admet que les oscillations se répètent un très-grand nombre de fois avant que les molécules lu-

mineuses éprouvent la polarisation fixe qui range leurs axes parallèlement et perpendiculairement à la section principale : il faut une épaisseur de plusieurs millimètres, et même de plusieurs centimètres, suivant cet habile physicien, pour que la polarisation mobile se change en polarisation fixe dans le cristal de roche ou la chaux sulfatée, du moins tant que le parallélisme des faces d'entrée et de sortie empêche la séparation des faisceaux ordinaire et extraordinaire, qui est toujours accompagnée de polarisation fixe. Mais, lorsque les faces sont parallèles, et que l'épaisseur de la plaque n'excède pas celles que nous venons d'indiquer, les molécules lumineuses qui l'ont traversée, au lieu d'être polarisées suivant la section principale et la direction perpendiculaire, le sont dans le plan primitif ou dans l'azimut $2i$, selon que la dernière oscillation de leurs axes les portait vers le premier ou le dernier plan, et soit qu'elle fût achevée ou seulement commencée au moment de leur sortie; au moins, selon M. Biot, se comportent-elles toujours, dans le rhomboïde qui sert à analyser la lumière émergente, comme si leur dernière oscillation avait été terminée. La durée de ces oscillations, ou l'épaisseur de cristal dans laquelle chacune d'elles s'exécute, est constante pour les molécules lumineuses de même nature; mais elle varie d'une espèce à l'autre proportionnellement aux longueurs d'accès.

Mais Fresnel a démontré, par des expériences multipliées, rapportées plus loin, que les deux faisceaux dans lesquels la lumière se divise en traversant une lame mince sont toujours polarisés suivant le section principale et le plan perpendiculaire, et que, dans les phénomènes de coloration que présentent les lames minces, la polarisation apparente suivant le plan primitif ou l'azimut $2i$, et seulement dans certaines circonstances, résulte de la réunion des faisceaux qui constituent les images ordinaire et extraordinaire.

1561. *Diffraction.* Pour expliquer la propagation curviligne de la lumière au delà du corps éclairé, Newton supposait que les rayons qui passent à une certaine distance des bords d'un corps sont détournés de leur direction par une force répulsive émanée du corps; cette action ayant d'autant plus d'influence que les rayons s'approchent davantage du corps, les rayons diffractés se coupent deux à deux, et forment une surface caustique (fig. 917 A) suivant laquelle se propage la lumière au delà du corps. Newton avait essayé d'expliquer les franges extérieures par des mouvements si-

neux qu'il supposait aux molécules lumineuses dans le voisinage des corps; mais cette explication ne pourrait point s'appliquer aux franges intérieures. C'est une chose singulière que, quoique les franges intérieures aient été observées et décrites par Grimaldi, et quoique Newton ait fait des observations sur des corps très-étroits (des cheveux) qui produisent des franges intérieures avec une grande netteté, ces franges aient échappé à ce grand physicien. Nous n'insisterons pas sur l'explication de Newton, parce qu'elle est insuffisante. Les phénomènes de diffraction sont ceux qui fournissent les arguments les plus concluants contre le système de l'émission.

1562. On voit, d'après tout ce que nous venons de dire, qu'il n'y a réellement que la réflexion et la réfraction qui s'expliquent d'une manière satisfaisante dans le système de l'émission, et encore il faut admettre que toutes les molécules d'une même teinte sont également attirées ou repoussées : car, si l'on faisait intervenir les accès de facile réflexion et de facile transmission, l'intensité de la force dépendrait des phases d'accès dans lesquelles se trouveraient les molécules à l'instant où elles arrivent à la distance à laquelle ses forces s'étendent, et par conséquent l'indice serait variable. Pour tous les autres phénomènes, il faut pour chacun d'eux de nouvelles hypothèses, et l'on peut dire que la théorie ne satisfait aux phénomènes que comme une formule empirique aux faits qui ont servi à la déterminer. En outre, la coloration de la lumière polarisée par les lames cristallisées n'est point expliquée, car l'ingénieuse théorie de la polarisation mobile ne s'accorde point avec les faits. Enfin les phénomènes de la diffraction sont non-seulement inexplicables dans ce système, mais en opposition manifeste avec l'hypothèse principale, qui repose sur une action des corps et de la lumière ne se manifestant qu'à une très-petite distance : en effet, les bandes diffractées ayant une courbure très-sensible sur une étendue de plusieurs mètres, et cette inflexion de la lumière étant indépendante de la nature des corps que rase la lumière, on ne peut pas admettre que ces phénomènes soient dus à une action de ces corps, car elle varierait avec leur nature. Mais le fait le plus remarquable est la formation des bandes obscures par l'action de deux faisceaux, car il en résulte que de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité : or, dans le système où la lumière est due à des particules lumineuses, deux faisceaux réunis doivent toujours augmenter son intensité.

§ 14. *Système des ondulations.*

1563. Le système des ondulations a été imaginé par Descartes, développé et approfondi dans ses conséquences mathématiques par Huyghens et Euler. Le système de l'émission, soutenu par le nom de Newton, l'avait fait abandonner; mais, dans ces derniers temps, les découvertes de Yong et de Fresnel, et surtout celles de ce dernier, ont porté dans ce système une clarté et une précision qui lui donnent la plus haute probabilité. Tout ce qui suit est extrait des nombreux mémoires de Fresnel.

Constitution des ondes, principe des interférences.

1564. Dans le système des ondulations on admet que l'espace et les intervalles des molécules des corps sont remplis d'un fluide impondérable très-élastique, désigné sous le nom d'éther. Dans le vide, ainsi que dans un même corps homogène, la densité et l'élasticité de l'éther sont les mêmes dans tous les points; mais elles changent avec la nature du corps, et dans les corps cristallisés l'élasticité de l'éther n'est pas la même dans toutes les directions.

1565. Les corps lumineux produisent de la lumière, comme les corps sonores produisent le son; et l'éther propage les ondes lumineuses, comme l'air propage les ondes sonores.

Les vibrations moléculaires des corps lumineux étant isochrones, tout ce que nous avons dit des ondes sonores est applicable aux ondes lumineuses. Aussi, chaque onde lumineuse est composée de deux demi-ondes égales, dans lesquelles les mouvements de l'éther sont de signes contraires; la longueur d'une onde est égale à la vitesse de propagation du mouvement dans l'éther, en prenant pour unité de temps la durée d'une vibration du corps lumineux; les ondes peuvent avoir des intensités et des longueurs différentes; l'intensité est proportionnelle à l'amplitude des oscillations ou à la vitesse des mouvements de l'éther.

1566. Mais il y a entre la nature des ondes sonores et celle des ondes lumineuses une différence essentielle : dans les premières, les mouvements ont lieu dans la direction même de la propagation, c'est-à-dire perpendiculairement à la surface des ondes; tandis que dans les dernières, le mouvement s'effectue perpendiculairement à la propagation, c'est-à-dire parallèlement à la surface des ondes. Nous examinerons d'abord comment ces derniers mouvements

peuvent se propager, et ensuite comment les vibrations des corps lumineux peuvent les produire.

« Considérons dans un fluide élastique trois files indéfinies parallèles et consécutives de points matériels. Si l'on suppose entre ces molécules une certaine loi de répulsion, elles affecteront, dans l'état d'équilibre et de repos absolu, un arrangement régulier d'après lequel elles seront également espacées sur les trois rangées, et celles de la file intermédiaire répondront, je suppose, aux milieux des intervalles compris entre les molécules des deux autres. Nous n'indiquons cette disposition particulière que pour fixer les idées, car il est clair qu'elle ne saurait avoir lieu suivant toutes les directions. Mais quelle que soit celle des files que l'on considère dans le milieu élastique, leurs points matériels tendront toujours à se placer dans les positions relatives qui amènent l'équilibre stable. Supposons donc que cette condition soit satisfaite : si l'on dérange un peu la file intermédiaire en la faisant glisser sur elle-même, mais seulement d'une quantité très-petite par rapport à l'intervalle de deux molécules consécutives, et qu'ensuite on la laisse libre, chacun de ses points matériels reviendra vers sa première situation (indépendamment de ce qui se passe aux extrémités de la rangée, puisque nous la supposons indéfinie), et oscillera de part et d'autre comme un pendule qui a été écarté de la verticale. Mais si l'on avait assez éloigné ces molécules de leurs points de départ pour les placer exactement vis-à-vis des molécules des deux autres rangées (supposées immobiles), il en serait résulté un nouvel équilibre. Faisons encore glisser la file intermédiaire jusqu'à ce que ses points matériels répondent de nouveau aux milieux des vides des deux autres, et elle rentrera dans un troisième état d'équilibre semblable au premier. On voit qu'en continuant à la faire glisser dans le même sens, elle serait en équilibre à chaque demi-intervalle des molécules, et n'éprouverait ainsi que dans les positions intermédiaires l'action des forces retardatrices, dont l'effet serait compensé, après chaque instant très-court, par des forces accélératrices qui leur succéderaient.

« Nous avons supposé, pour simplifier les idées, que les deux tranches voisines de la tranche intermédiaire restaient en repos pendant que celle-ci glissait sur elle-même. Il est clair que les choses ne se passent pas de cette manière, et qu'une tranche ne peut pas se déplacer sans mettre en mouvement les tranches voisines. La rapidité plus ou moins grande avec laquelle

le mouvement se propage dépend de l'énergie de la force accélératrice qui tend à ramener les tranches contiguës dans les mêmes positions relatives, et des masses de ces tranches, comme la vitesse de propagation des ondes sonores de l'air (telles qu'on les conçoit ordinairement) dépend du rapport entre sa densité et la résistance qu'il oppose à la compression. Il est évident qu'on peut appliquer à ces nouvelles oscillations perpendiculaires aux rayons les mêmes raisonnements et les mêmes calculs qu'à celles où le mouvement oscillatoire s'exécute suivant les directions de propagation.

1567. « On peut se rendre compte de l'origine des vibrations transversales en remarquant que, quand une molécule est ébranlée dans une direction quelconque, ce petit mouvement est en général incliné sur la ligne qui joint cette molécule à la plus voisine, et peut toujours être décomposé en trois autres petits mouvements rectangulaires, dirigés, l'un suivant la plus courte distance à la molécule voisine, et les deux autres perpendiculairement à cette direction. Alors la première composante produira des mouvements de condensation et de dilatation, analogues à ceux que l'on considère dans les ondes sonores, et les deux autres des petits mouvements perpendiculaires aux premiers, et qui seront en même temps perpendiculaires à la direction de la propagation. Ainsi, l'ébranlement d'un fluide devrait donner naissance à trois systèmes d'ondes : dans l'un, le mouvement se transmettrait par des compressions et des dilations successives; et, dans les deux autres, par de petits déplacements des molécules sans variation de densité. Il faudrait alors admettre que l'oreille ne peut être ébranlée que par les ondes qui se propagent par des condensations et des dilatations, que pour l'œil c'est le contraire, et que les effets qui seraient produits par les autres systèmes d'ondes nous sont inconnus. » (Fresnel.)

De la constitution des ondes, indépendamment de la direction du mouvement vibratoire, résulte une conséquence importante découverte par Yong, et qui est connue sous le nom de *principe des interférences;* nous l'exposerons avec tous les détails nécessaires.

1568. *Principe des interférences.* Nous avons vu qu'un mouvement oscillatoire isochrone produit dans le milieu élastique environnant une série d'ondes de même longueur, composées de demi-ondes dans lesquelles les mouvements sont égaux, mais de signe contraire. Il résulte de là que, si deux systèmes d'ondes, ayant la même longueur d'ondulation, et la même intensité, se

propagent dans le même sens, et que l'un deux soit en retard sur l'autre, d'une demi-ondulation ou d'un nombre quelconque impair de demi-ondulations, tous les mouvements se détruiront; mais que, si la différence de marche est égale à un nombre pair de demi-longueur d'ondulation, ils concourront tous deux à imprimer à l'éther des mouvements dans le même sens, et leurs effets s'ajouteront. Si les intensités des deux systèmes d'ondes n'étaient pas égales, il est évident que dans le premier cas, les vitesses ne se détruiraient pas; il se produirait un système d'ondes résultantes, dans lesquelles la vitesse de l'éther serait égale à la différence des vitesses dans les deux ondes composantes.

Quand les ondes, toujours de même longueur et d'inégale intensité, diffèrent de marche d'une quantité qui n'est pas un multiple d'une demi-ondulation, elles produisent un système d'ondes de même longueur que les ondes composantes, mais dans lesquelles la vitesse de l'éther et la position par rapport aux ondes composantes dépendent des intensités des premières et de leur différence de marche, comme on peut le voir dans l'article suivant.

1569. Nous avons vu [428], p. 318 du t. 1er, qu'en désignant par v la vitesse de l'air à un instant t, à une distance x du centre d'ébranlement, et par λ la longueur d'une onde condensée ou dilatée, on avait

$$v = A \sin \pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right).$$

La même formule sera applicable à la lumière; mais nous prendrons pour unité de temps la durée d'une vibration complète du corps lumineux, et pour λ la longueur totale de l'onde résultant des deux oscillations contraires du corps lumineux : alors t sera deux fois plus petit, λ deux fois plus grand, et la formule deviendra

$$v = A \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right).$$

A l'aide de cette formule on peut facilement calculer la vitesse qu'acquiert une molécule d'éther, par un nombre quelconque d'ondes qui se meuvent parallèlement, et qui ont la même longueur.

Nous désignerons par a et a' les intensités de deux ondes élémentaires, par u et u' les vitesses que chacun des faisceaux imprimerait séparément à la molécule d'éther, par V la vitesse qu'elle éprouve par le concours des deux faisceaux, par x la distance du premier centre d'ébranlement, et enfin par c l'intervalle qui sépare les points correspondants des deux ondes élémentaires; nous aurons :

$$u = a \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right), \quad u' = a' \sin 2\pi \left(t - \frac{x + c}{\lambda}\right), \quad \text{et } V = u + u'.$$

Ainsi $$V = a \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) + a' \sin 2\pi \left(t - \frac{x+c}{\lambda}\right),$$

$$= a \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) + a' \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) \cos 2\pi \frac{c}{\lambda} - a' \cos 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) \sin 2\pi \frac{c}{\lambda},$$

$$= \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) \left(a + a' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda}\right) - a' \cos 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) \sin 2\pi \frac{c}{\lambda}.$$

Posons $$a + a' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda} = A \cos i \qquad (a)$$

et $$a' \sin 2\pi \frac{c}{\lambda} = A \sin i \qquad (b)$$

il viendra $$V = A \sin\left[2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) - i\right] \qquad (c)$$

Si nous faisons

$$2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) - i = 2\pi t', \quad \text{d'où} \quad t' = t - \frac{x}{\lambda} - \frac{i}{2\pi},$$

ce qui ne fait que changer l'origine du temps, il vient

$$V = A \sin 2\pi t'$$

La valeur de V prend alors la même forme que celle de u et u', et l'on voit qu'elle éprouve des variations périodiques qui se succèdent à des intervalles égaux à l'unité de temps : ainsi l'onde résultante est une onde de même longueur que les ondes composantes, et ayant une certaine intensité A. Pour obtenir cette intensité, élevons séparément au carré les équations (a) et (b), et faisons-en la somme, il viendra

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda}. \qquad (d)$$

Quant à la position de l'onde résultante, on la trouvera facilement en mettant l'équation (c) sous la forme

$$V = A \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda} - \frac{i}{2\pi}\right) = A \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda} - \frac{\lambda i}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda}\right) :$$

car, en la comparant aux équations qui donnent les valeurs de u et de u', on voit facilement que l'onde résultante est éloignée de la première de $\frac{\lambda i}{2\pi}$, et de la seconde de $c - \frac{\lambda i}{2\pi}$. Il résulte de là et de la valeur de A une conséquence très-remarquable. La valeur de A donnée par l'équation (d) est la résultante de deux forces, a et a', qui font entre elles un angle $2\pi . \frac{c}{\lambda}$; et, d'après l'équation (b), l'angle i est l'angle formé par la résultante avec la première compo-

sante : celui de la résultante avec la seconde composante est alors $c.\ 2\pi\frac{c}{\lambda} - i$. Or, ces angles et l'angle des deux composantes $2\pi\frac{c}{\lambda}$ sont dans les mêmes rapports que les distances des ondes élémentaires à l'onde résultante et entre elles ; et on est conduit à une construction géométrique très-simple pour trouver l'onde résultante et sa position par rapport aux ondes composantes. Si l'on trace deux lignes faisant entre elles un angle égal à $2\pi\frac{c}{\lambda}$, et ayant pour longueurs a et a', la diagonale représentera l'intensité de l'onde résultante, et les arcs compris entre ces trois lignes les positions relatives des trois systèmes d'ondes.

S'il y avait un nombre quelconque d'ondes parallèles, la même méthode pourrait être employée à la détermination de l'onde résultante.

1570. Les interférences ne pourront se manifester que quand les ondes auront exactement la même longueur ; mais, si chacun des systèmes d'ondes en renfermait plusieurs dont les longueurs d'ondulation différassent très-peu les unes des autres, quelque légère que fût cette différence, quand elle serait répétée un grand nombre de fois, elle produirait nécessairement une opposition dans les modes d'interférence des différents systèmes : l'affaiblissement des uns se trouverait compensé par le renforcement des autres, et, par conséquent, les effets d'interférence disparaîtraient. On voit alors que les phénomènes d'interférence ne pourront se manifester dans la lumière, en apparence la plus homogène, qu'autant que la différence de marche ne contiendra pas un trop grand nombre d'ondulations.

1571. « Enfin il est une dernière condition nécessaire à la manifestation des phénomènes d'interférence, et dont nous n'avons point encore parlé : c'est que les rayons soient partis d'une source commune. En effet, tout système d'ondes qui en rencontre un autre exerce toujours sur lui la même influence quand leurs positions relatives sont les mêmes, qu'ils émanent d'une source commune, ou de sources différentes : car il est clair que les raisonnements par lesquels nous avons expliqué leur influence mutuelle sont également applicables aux deux cas. Mais il ne suffit pas que cette influence existe pour qu'elle soit sensible à nos yeux ; il faut encore que ses effets soient permanents, et c'est ce qui ne peut avoir lieu lorsque les deux systèmes d'ondes qui interfèrent, émanent de sources différentes. En effet, les particules des corps lumineux dont les vibrations ébranlent l'éther doivent éprouver de fréquentes perturbations dans leurs oscillations en raison des changements

rapides qui s'opèrent autour d'elles, ce qui peut néanmoins très-bien se concilier avec l'émission régulière d'un grand nombre d'ondulations dans chacune des séries séparées par ces perturbations. Cela posé, on ne peut admettre que ces perturbations s'opèrent simultanément et de la même manière dans des particules séparées et indépendantes; en sorte qu'il arrivera, par exemple, que les oscillations de l'une seront retardées d'une demi-oscillation complète, tandis que celles de l'autre continueront sans interruption, ou seront retardées d'une oscillation entière; ce qui changera complétement les effets d'interférence des deux systèmes d'ondes qu'elles produisent : car il y avait accord parfait entre les mouvements dans le premier cas, et il y aura discordance complète dans le second. Or, ces effets opposés, se succédant avec une extrême rapidité, ne produiront sur l'œil qu'une sensation continue, qui sera moyenne entre les sensations plus ou moins vives qu'ils exciteraient séparément, et qui restera constante, quelle que soit la différence des chemins parcourus.

« Il n'en est pas de même lorsque les deux faisceaux émanent d'une source commune : alors les deux systèmes d'ondes qui sont partis d'un même centre de vibration, éprouvant des perturbations de la même manière et au même instant, n'en reçoivent aucun changement dans leurs positions relatives; en sorte que, s'ils discordaient complétement d'abord, ils continueront à se trouver en discordance complète; et si les mouvements s'accordaient, le même accord subsistera toujours, tant que le centre de vibration enverra de la lumière. Ainsi, dans ce cas, les effets seront constants et deviendront perceptibles. C'est un principe qui s'applique à tous les effets produits par les combinaisons des ondes lumineuses; ils ne peuvent être sensibles que lorsqu'ils sont permanents.

1572. « Jusqu'à présent, nous avons supposé que les deux systèmes d'ondes marchaient suivant la même direction, et qu'en conséquence, leurs mouvements oscillatoires s'exécutaient aussi suivant une direction commune, soit dans le même sens, soit en sens opposé : c'est le cas le plus simple d'interférence et le seul dans lequel il puisse y avoir destruction totale du mouvement par un autre : car il faut pour cela, non-seulement que les forces soient égales et en sens contraires, mais encore qu'elles agissent suivant la même ligne droite, c'est-à-dire, en un mot, qu'elles soient directement opposées.

« Dans le cas où les rayons qui interfèrent forment entre eux des

angles sensibles, mais très-petits, les impulsions apportées dans les mêmes points de l'éther par les deux systèmes d'ondes se croisent aussi sous des angles sensibles; mais à cause de la petitesse de ces angles, la résultante des deux impulsions est presque exactement égale à leur somme lorsque les impulsions agissent dans le même sens, et à leur différence lorsqu'elles agissent en sens contraire : ainsi, dans les points d'accord ou de discordance, l'intensité de la lumière sera la même que si les deux faisceaux lumineux avaient suivi la même direction; mais les variations d'intensité n'auront lieu qu'aux points de croisement des rayons. » (FRESNEL.)

Considérons, par exemple, deux points lumineux voisins, d'où partent simultanément des ondes de même intensité et de même longueur : dans tous les points de l'espace pour lesquels la différence des distances aux deux points lumineux sera égale à un nombre impair de demi-longueurs d'ondulation, la lumière sera détruite; elle sera, au contraire, à son maximum à tous les points pour lesquels la différence des distances sera un nombre pair de demi-longueurs d'onde. Ainsi, les lieux obscurs et éclairés formeront des hyperboloïdes de révolution autour de la ligne qui joint les points lumineux, dont ces points seront les foyers, et dont la différence des rayons vecteurs sera pour les points obscurs, $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$, etc., et pour les points lumineux, λ, 2λ, 3λ, 4λ, etc. Si les points étaient remplacés par des lignes lumineuses parallèles, les points obscurs et lumineux formeraient des cylindres hyperboliques qui projetteraient sur un écran parallèle aux lignes lumineuses des franges parallèles sensiblement équidistantes.

1573. Voici maintenant l'expérience de Fresnel, qui démontre l'exactitude de toutes ces déductions théoriques.

Soient ED et DF (fig. 918) deux miroirs plans métalliques ou de verre noir, réunis en D sous un angle très-voisin de 180°, et placés dans une chambre obscure; S un point lumineux formé au foyer d'une lentille d'un très-court foyer, éclairée par le soleil. Il est évident que, si du point S on abaisse deux perpendiculaires SP et SQ sur les deux miroirs, et qu'on prenne BQ = SQ et PA = SP, les rayons réfléchis sur les deux miroirs étant prolongés, iront passer par les points A et B, et, par conséquent, on pourra ne point avoir égard aux miroirs et considérer les rayons comme émanant des points A et B : les chemins parcourus seront

les mêmes : car, d'après la construction précédente, pour deux rayons quelconques SG et SH on a

$$SGb = BGb, \quad \text{et} \quad SHb = AHb.$$

Les deux systèmes d'ondes pouvant être considérés comme émanant des points A et B seront terminés par des surfaces sphériques ayant pour centre ces points; et tout ce que nous avons dit précédemment sur les effets résultant de l'interférence des ondes émanées de deux points devra se réaliser, si notre théorie est exacte : or, il résulte de l'expérience que, si on reçoit sur un écran la lumière réfléchie par les miroirs, quand elle est homogène, l'image est formée de bandes hyperboliques alternativement brillantes et obscures, à égale distance les unes des autres, et dirigées perpendiculairement à la ligne qui joint les deux images des points lumineux. La bande centrale est très-brillante : elle est placée entre deux bandes obscures du noir le plus foncé; mais, à mesure que les bandes s'écartent du centre, leur vivacité diminue. Ce phénomène a lieu quelle que soit la teinte de la lumière; mais les largeurs des bandes sont différentes. La lumière blanche donne des bandes irisées par la superposition partielle des bandes de différentes couleurs. Ainsi la vérification est complète.

Cette expérience donne le moyen de mesurer les longueurs d'ondulation des rayons colorés avec une très-grande précision, en mesurant l'angle A*b*B et la distance des centres de deux franges quelconques; mais, avant de faire voir comment on y parvient, nous avons quelques détails à donner sur différentes circonstances de l'expérience.

Le foyer lumineux doit être le plus petit possible, car chaque point mathématique du foyer forme un système de franges dont la position dépend de celle de ce point : par conséquent, si le foyer avait une étendue un peu considérable, les franges seraient diffuses. Pour que le rayon solaire puisse se prolonger suffisamment dans la chambre obscure, on doit le rendre horizontal à l'aide d'un miroir placé en dehors; et, quand on veut procéder à des mesures exactes des franges, il faut rendre la direction du rayon constante à l'aide d'un héliostat [1341]. Nous avons dit que l'on recevait les franges sur un carton blanc; mais il est beaucoup plus avantageux de les regarder dans l'espace avec une loupe [1418]. Pour mesurer les distances des franges, Fresnel se servait du micromètre décrit précédemment [1418].

1574. Revenons maintenant à la mesure des longueurs d'ondulations : dans la figure, les lignes hyperboliques br, $b'r'$, etc., représentent les lignes suivant lesquelles se propagent les franges brillantes, et les lignes no, $n'o'$, etc., les directions des franges obscures; ainsi ib représente la longueur d'ondulation, et bb' la distance du milieu de la frange centrale au centre de la première frange brillante; le triangle $bb'i$ pouvant être considéré comme rectiligne à cause de la petitesse des arcs, et l'arc bi étant très-petit relativement à bb', on a sensiblement

$$bi = \lambda = bb' \sin bb'i;$$

mais l'angle bbi' ayant ses côtés perpendiculaires à ceux de l'angle AbB, lui est égal; et, en le désignant par i, il vient

$$bi = \lambda = bb' \sin i.$$

D'après ce qui précède, bb' peut se mesurer avec une grande précision; et l'angle i peut s'obtenir directement au moyen d'un cercle répétiteur; c'est ainsi que Fresnel a obtenu les résultats suivants :

LIMITES des COULEURS PRINCIPALES.	VALEURS EXTRÊMES de λ.	COULEURS PRINCIPALES.	VALEURS MOYENNES de λ.
	mm		mm
Violet extrême.....	0,000406	Violet.....	0,000423
Violet-indigo.....	0,000439	Indigo.....	0,000449
Indigo-bleu.....	0,000459	Bleu.....	0,000475
Bleu-vert.....	0,000492	Vert.....	0,000512
Vert-jaune.....	0,000532	Jaune.....	0,000551
Jaune-orangé.....	0,000571	Orangé.....	0,000583
Orangé-rouge.....	0,000596	Rouge.....	0,000620
Rouge extrême.....	0,000645		

Nous allons maintenant examiner successivement les différentes classes de phénomènes que présente la lumière, et exposer avec les détails nécessaires les explications qui en ont été données par Fresnel.

Intensité, réflexion, réfraction, dispersion.

1575. *Intensité de la lumière.* Lorsqu'on considère la lumière comme se propageant par des mouvements ondulatoires, l'intensité doit varier comme celle du son, proportionnellement au carré de l'amplitude des oscillations; et comme d'après le calcul cette amplitude ou la vitesse d'oscillation diminue proportionnellement à la distance au centre d'ébranlement, il en résulte que l'intensité de la lumière varie en raison inverse du carré de la distance.

1576. *Réflexion.* Considérons d'abord un faisceau de rayons parallèles ED et FG (fig. 919), partis d'un même centre d'ondulation, et soit GI un plan perpendiculaire à tous les rayons, et qui, par conséquent, représentera la direction de l'onde incidente; tous les points de rencontre des rayons avec la surface réfléchissante deviendront des centres de vibrations, les surfaces enveloppes de toutes ces ondes formeront évidemment l'onde réfléchie, et il suffira, pour en connaître la position, de déterminer celle d'une surface enveloppe quelconque. Cherchons la surface qui passe par le point D, c'est-à-dire l'onde réfléchie lorsqu'un certain mouvement dirigé suivant ED arrive en D; le mouvement correspondant propagé suivant FG est arrivé plus tôt, et le point G a évidemment déjà produit une onde sphérique dont le rayon est ID. Le point qui est au milieu de GD aura produit de même une onde sphérique dont le rayon est $\frac{1}{2}$ID, de sorte que, si l'on mène par le point D une droite CD symétrique à GI, les rayons des ondes partis de différents points de GD seront proportionnels aux distances de ces points à la ligne DC : ainsi le plan DC sera tangent à toutes ses ondes, et sera, par conséquent, la direction de l'onde cherchée. Il résulte évidemment de là les deux lois connues de la réflexion : car les rayons incidents et réfléchis sont perpendiculaires aux surfaces des ondes, et les rayons correspondants doivent passer par un même point de la surface réfléchissante.

Si les rayons partaient d'un point placé à une distance finie du miroir (fig. 920), tous les points de l'onde réfléchie devraient se trouver à la même distance du point O en passant par la surface réfléchissante; d'où il suit évidemment que les ondes réfléchies seront des sphères ayant leur centre commun au point O', symétrique de O par rapport au miroir, et que les rayons incidents et réfléchis, placés dans des plans normaux, seront également inclinés sur sa normale.

Il est important de remarquer que tous les rayons qui partent de la surface réfléchissante dans d'autres directions que celle de la réflexion régulière se détruisent complétement par leur interférence. En effet, si l'on mène deux rayons quelconques G*k* et D*l*, G*c* ne sera plus égal à ID, et l'on pourra toujours prendre GD tel que la différence des chemins soit égale à une demi-ondulation : alors les deux rayons G*k* et D*l* se détruiront mutuellement. Mais on conçoit que, si l'on supprimait D*l*, la neutralisation n'aurait plus lieu et que le rayon G*k* deviendrait visible. En général les rayons émanés du point D sous une incidence plus grande ou plus petite que celle de la réflexion régulière, sont détruits par les rayons parallèles situés à droite et à gauche, et qui partent de points d'autant plus voisins du point D que leur obliquité est plus grande. En effet, si l'on désigne par i et r les angles d'incidence et de réflexion, pour que les rayons G*k* et D*l* se détruisent par leur interférence, il faut que la différence des chemins $Gc - DI = 1/2\lambda$; mais $Gc = GD \sin r$, et $DI = GD \sin i$: ainsi on a $GD\,(\sin r - \sin i) = 1/2\lambda$, et, par conséquent, GD sera d'autant plus petit que r différera davantage de i. Il résulte de là que, quand les deux bords du miroir sont très-éloignés, il n'y a qu'une très-petite largeur vers les bords dont les rayons puissent dévier, et ils ont une très-faible intensité, car ils sont en partie neutralisés par ceux de même inclinaison qui partent des points précédents. Ainsi le faisceau réfléchi aura sensiblement la forme et les dimensions du faisceau incident prolongé au delà de la surface réfléchissante. Mais, si la largeur du miroir était très-petite, à mesure qu'elle diminuerait, la neutralisation des rayons qui s'écartent de la direction correspondante à la loi serait moins complète, et l'intensité des rayons divergents irait en croissant. C'est ce que Fresnel a vérifié par l'observation que nous allons rapporter. Si l'on colle sur un miroir métallique deux bandes de papier noir, de manière à ne laisser à découvert qu'un espace triangulaire très-aigu, en éclairant cet espace par des rayons solaires et recevant l'image sur un carton à une grande distance, cette image paraît plus large dans les points correspondants aux parties les plus étroites du miroir; par conséquent, la divergence des rayons est d'autant plus grande que l'espace réfléchissant est plus petit.

D'après ce qui précède, il est facile d'expliquer pourquoi les corps terminés par des surfaces non polies réfléchissent de la lumière dans toutes les directions, et pourquoi la quantité de lumière réfléchie régulièrement augmente avec l'inclinaison des rayons. En

effet, quand un corps est terminé par une surface quelconque, tous les points de cette surface deviennent des centres de rayonnement; si la surface est polie, tous les rayons qui ne sont pas disposés symétriquement aux rayons incidents se détruisent par leur interférence; mais, si la surface était parsemée de cavités ayant une grande profondeur relativement à la longueur d'une ondulation, et il suffit pour cela que ces profondeurs aient quelques dix-millièmes de millimètre, les rayons partis de points voisins ne peuvent plus interférer, et, par conséquent, la lumière est réfléchie dans tous les sens. Mais à mesure que les rayons incidents s'inclinent davantage, ils pénètrent à des profondeurs décroissantes, et les phénomènes deviennent les mêmes que si l'on diminuait la hauteur des aspérités de la surface.

1577. *Réfraction.* Considérons d'abord un faisceau incident de rayons parallèles (fig. 921); GI étant un plan perpendiculaire au faisceau représentera le plan de l'onde incidente. Il est évident que quand un certain mouvement vibratoire arrivera au point D, le mouvement correspondant propagé suivant FG sera déjà parvenu au point G, et ce mouvement aura produit une onde sphérique dont le rayon sera égal à ID multiplié par $v' : v$, v et v' étant les vitesses de la lumière dans le premier et le second milieu; le point m, milieu de GD, aura donné naissance à une onde dont le rayon sera deux fois plus petit; et comme les ondes parties des différents points de GD auront des rayons proportionnels à la distance de ces points au point D, il est facile de voir que ces ondes auront un plan tangent DM commun qui représentera, par conséquent, la direction de l'onde réfractée; les normales aux ondes représentant les rayons, l'angle IGD est égal à l'angle d'incidence, et l'angle GDM est égal à l'angle de réfraction; mais on a $GD = ID : \sin i$, et $GD = GM : \sin r$, et, par conséquent, $ID : \sin i = GM : \sin r$; mais $GM = ID \times v' : v$, donc $v' \sin i = v \sin r$; ce qui est la loi de la réfraction. Quant à la première, savoir que les rayons incidents et réfractés sont dans un même plan normal, elle résulte évidemment de ce que les rayons sont perpendiculaires aux ondes, que ces ondes sont des surfaces planes, toutes les deux perpendiculaires au plan d'incidence, et que les rayons incidents et réfractés correspondants doivent passer par un même point de la surface du milieu réfringent.

Si le point lumineux était à une distance finie, on pourrait prendre des faisceaux assez petits pour que les rayons pussent être

considérés comme parallèles : alors les lois de la réfraction seraient encore vraies pour chacun de ces faisceaux élémentaires; mais l'onde réfractée ne serait plus sphérique, comme l'onde incidente.

Il faut remarquer que la construction indiquée pour déterminer la position de l'onde réfractée n'est possible qu'autant que GM est plus petit que GD, et c'est ce qui existe toujours quand le second milieu est plus réfringent que le premier : car alors GM est $<$ que ID, et ID est toujours $<$ que GD. Mais, dans le cas contraire, la réfraction pourra ne pas être possible, et, pour savoir quand cela arrivera, il faut remarquer que

$$GD = GM : \sin r = GM.n : \sin i :$$

ainsi, quand $n : \sin i$ sera $<$ que 1, c'est-à-dire quand $\sin i$ sera $>$ que n, la réfraction n'existera plus; ce qui est d'accord avec ce que nous savons déjà. Dans ce cas, n est évidemment $<$ que 1.

On reconnaîtra facilement, par les mêmes raisonnements que pour la réflexion, que les rayons qui n'auraient pas la direction indiquée par la loi se détruiraient par leur interférence, et, par suite, que le faisceau réfracté est limité.

Il résulte de l'explication de la réfraction que nous venons d'exposer, que $n = v : v' :$ alors, quand n est plus grand que l'unité, v est plus grand que v'; ainsi la vitesse de la lumière est plus grande dans le vide que dans un corps réfringent. Dans le système de l'émission on est conduit à un résultat opposé.

Il est important aussi de remarquer que si λ et λ' représentent les longueurs d'ondulation dans l'air et dans le corps, comme ces longueurs sont les chemins parcourus par la lumière dans le même temps, elles sont en raison directe des vitesses de la lumière dans les deux milieux, et on a

$$\lambda : \lambda' = v : v' = n.$$

1578. Une expérience très-curieuse de MM. Fresnel et Arago vient à l'appui de ce résultat du système des vibrations. Dans l'expérience des deux miroirs que nous avons décrite précédemment, les franges sont toujours placées symétriquement par rapport au plan mené par le milieu de la ligne qui joint les deux images du point lumineux et perpendiculairement à cette direction. Mais il est évident que cette symétrie suppose nécessairement que les deux faisceaux qui interfèrent parcourent le même milieu dans tout le trajet : car, s'il n'en était pas ainsi, tout le système des franges

serait porté du côté du faisceau qui aurait traversé le corps le plus réfringent, puisque les distances du milieu de la frange centrale aux deux points lumineux doivent renfermer le même nombre de longueurs d'ondulation ; et, ces longueurs étant d'autant plus petites dans les corps qu'ils sont plus réfringents, la distance métrique de la frange centrale au point lumineux dont les rayons ont traversé le corps réfringent devra être plus petite que l'autre. L'expérience a parfaitement confirmé cette conséquence de la théorie. Lorsqu'on place une lame mince de mica ou de chaux sulfatée sur le chemin d'un des faisceaux, les franges sont portées de ce côté, et quand les lames ne sont pas très-minces, elles sortent de l'espace éclairé et disparaissent.

Cette expérience est même le moyen le plus exact qu'on connaisse pour déterminer les indices de réfraction. En effet, supposons qu'on ait mesuré très-exactement, à l'aide d'un sphéromètre, l'épaisseur de la lame mince qui a été placée dans le trajet d'un des faisceaux lumineux, et qu'on ait mesuré le déplacement des franges à l'aide du micromètre ; supposons, par exemple, que la bande centrale ait été déplacée de m largeurs de frange, que e représente l'épaisseur de la lame mince, et λ, λ', les longueurs d'ondulation de la lumière dans l'air et dans la lame mince ; il est évident que le nombre des ondulations renfermées dans une lame d'air ayant une épaisseur e, augmenté de m, sera égal au nombre des ondulations comprises dans la lame mince : ainsi on aura

$$\frac{e}{\lambda}+m=\frac{e}{\lambda'}, \quad \text{d'où} \quad \frac{\lambda}{\lambda'}=\frac{v}{v'}=\frac{e+m\lambda}{e}.$$

La détermination des indices de réfraction par le procédé que nous venons d'indiquer est susceptible d'une très-grande précision ; mais pour l'appliquer aux corps solides ou liquides il exige que ces corps soient réduits en lames très-minces, afin que le déplacement des franges ne les fasse pas sortir du champ lumineux ; ou bien que l'on place dans les deux faisceaux des plaques épaisses produisant des effets peu différents, dont on connaisse les épaisseurs et l'indice de l'une d'elles. Mais elle est surtout avantageuse pour la détermination des indices des corps qui diffèrent peu, et principalement pour ceux des gaz et des vapeurs. C'est par cette méthode que MM. Fresnel et Arago ont déterminé la différence de réfraction de l'air sec et de l'air saturé de vapeur d'eau à 30°, différence qui est si petite qu'elle échapperait à tout autre moyen d'observation.

1579. Si nous désignons par e, e', d, d', les élasticités et les densités de l'éther dans le vide et dans un milieu réfringent, et par u et u' les vitesses de la lumière dans ces deux milieux, on aura, comme pour la vitesse de propagation du son,

$$u = \sqrt{\frac{e}{d}}, \quad \text{et } u' = \sqrt{\frac{e'}{d'}}; \quad \text{d'où } n^2 = \frac{ed'}{e'd},$$

et, par suite,

$$n^2 - 1 = \frac{ed' - e'd}{e'd}.$$

Si l'on pose $d = em$ et $d' = e'm'$, il vient

$$n^2 - 1 = \frac{m' - m}{m}.$$

Ainsi la puissance réfractive est la différence des rapports de la densité de l'éther à son élasticité dans le corps réfringent et dans le vide, relativement à ce rapport dans le vide; et, si l'on suppose que $d = d'$, $n^2 - 1$ devient égal à $(e - e') : e'$, et représente l'accroissement d'élasticité de l'éther par rapport à son élasticité dans le second milieu.

1580. *Dispersion.* Nous avons vu, en parlant du son, que les ondes se propagent toujours dans le même milieu avec la même vitesse, quelle que soit d'ailleurs leur longueur. Mais il n'en est pas de même des ondes lumineuses : les vitesses de propagation sont d'autant plus petites qu'elles sont plus courtes, puisqu'elles sont décroissantes du rouge au violet. Cette différence entre la propagation du son et de la lumière provient de ce que, pour le son, les longueurs d'ondulation sont toujours très-grandes relativement à la distance à laquelle s'étendent les actions des forces développées, tandis que, pour la lumière, les longueurs d'ondulation sont comparables à la limite d'action des forces. On se rendra facilement compte de cette différence, si l'on remarque que les ondes sonores les plus courtes sont toujours de plusieurs centimètres, tandis que les ondes lumineuses les plus longues ne sont que de $0^{mm},000620$. En partant du fait que nous venons de supposer, Fresnel a démontré rigoureusement que la vitesse de propagation des ondes dans le même milieu était d'autant plus petite que les ondes sont plus courtes, et, plus récemment, M. Cauchy a démontré que dans un milieu quelconque, quelle que soit d'ailleurs la limite des forces, la vitesse de propagation diminue avec la longueur d'ondulation.

On voit d'après cela que, quand un faisceau de lumière blanche pénètre obliquement dans un corps réfringent, chaque faisceau

homogène suit une route différente, d'autant plus rapprochée de la normale que sa longueur d'ondulation est plus courte.

Anneaux colorés.

1581. Les anneaux colorés produits par réflexion sur une lame mince résultent de l'interférence des rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la lame; les anneaux vus par transmisson proviennent de l'interférence des rayons transmis directement, et de ceux qui traversent la lame mince après avoir éprouvé deux réflexions intérieures. Mais, pour démontrer que ces interférences produisent les phénomènes observés, il faut avoir recours à un principe découvert par Yong, et démontré ensuite rigoureusement par M. Poisson. Voici en quoi il consiste : lorsqu'une onde tend à passer d'un milieu dans un autre moins réfringent, une partie de l'onde est réfléchie dans le premier milieu, et l'onde réfléchie est la continuation de l'onde incidente; mais si le second milieu est plus réfringent que le premier, les mouvements dans l'onde réfléchie changent de signe. Ce phénomène est tout à fait analogue à ce qui se produit dans le choc de deux billes : la bille choquante prend des vitesses de signes contraires quand la bille choquée a une masse plus petite ou plus grande que la sienne, et elle reste en repos quand les masses sont égales.

« Cela posé, admettons d'abord qu'on observe la lumière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire, ou du moins dans une direction qui s'en écarte très-peu; considérons un des systèmes d'ondes envoyés par l'objet éclairant sur la première surface de la lame d'air, c'est-à-dire sur la seconde surface du verre supérieur. Ce que nous dirons de ce système d'ondes pourra s'appliquer à tous les autres. Au moment où il arrive à la surface de séparation du verre et de l'air, il éprouve une réflexion partielle qui diminue un peu l'intensité de la lumière transmise dans la lame d'air, et fait naître en dedans du premier verre un autre système d'ondes, dont l'intensité est, comme on sait, très-inférieure à celle de la lumière transmise; en sorte que celle-ci, étant fort peu affaiblie par cette première réflexion, produit, en arrivant à la seconde surface de la lame d'air, un second système d'ondes réfléchies d'une intensité presque égale à celle des ondes qui proviennent de la première réflexion : voilà pourquoi leur interférence produit des couleurs si vives dans la lumière blanche, et des anneaux brillants et obscurs si prononcés dans une lumière homogène. Les deux surfaces de la

lame d'air étant sensiblement parallèles dans le voisinage du point de contact où se forment les anneaux colorés, les deux systèmes d'ondes suivront la même route; mais celui qui a été réfléchi à la seconde surface se trouvera en retard relativement à l'autre, et d'une quantité égale au double de l'épaisseur de la lame d'air qu'il a traversée deux fois. Il faut encore remarquer qu'il existe entre eux une autre différence : c'est que le premier a été réfléchi en dedans du verre ou du milieu le plus dense, tandis que l'autre l'a été en dehors du verre inférieur; d'où il résulte, d'après le principe établi ci-dessus, une opposition dans les mouvements oscillatoires. Ainsi, lorsqu'en raison de la différence des chemins parcourus, les deux systèmes d'ondes devraient être d'accord, c'est-à-dire exécuter tous leurs mouvements oscillatoires dans le même sens, nous en concluons qu'ils sont, au contraire, en discordance complète; et réciproquement, lorsque la différence des chemins parcourus indiquera une discordance complète, nous en conclurons que leurs mouvements oscillatoires s'accordent parfaitement. D'après cela, il est aisé de déterminer la position des anneaux obscurs et brillants.

« Et d'abord, le point de contact, où l'épaisseur de la lame d'air est nulle, ne produisant aucune différence de marche entre les deux systèmes d'ondes, devrait établir un accord parfait entre leurs vibrations : ainsi, puisqu'en raison de l'opposition de signe, c'est le contraire qu'il faut prendre, leurs vibrations seront en discordance complète, et le point de contact, vu par réflexion, présentera une tache noire. A mesure qu'on s'en éloigne, l'épaisseur de la lame d'air augmente. Arrêtons-nous au point où son épaisseur est égale à un quart d'ondulation : la différence des chemins parcourus sera une demi-ondulation, qui répond à une discordance complète, et, par conséquent, il y aura accord parfait entre les deux systèmes d'ondes; ce sera donc le point le plus éclairé du premier anneau brillant. Lorsque l'épaisseur de la lame d'air sera la moitié d'une ondulation, la différence des chemins parcourus étant égale à une ondulation qui répond à l'accord parfait, il y aura discordance complète, et ce point sera le milieu d'un anneau obscur. Il est facile de voir en général, par les mêmes raisonnements, que les points les plus noirs des anneaux obscurs répondent aux épaisseurs de la lame d'air, égales à

$$0, \frac{2}{4\lambda}, \frac{4}{4\lambda}, \frac{6}{4\lambda}, \frac{8}{\lambda}, \text{ etc.},$$

et les points les plus éclairés des anneaux brillants aux épaisseurs

$$\frac{1}{4\lambda},\ \frac{3}{4\lambda},\ \frac{5}{4\lambda},\ \frac{7}{4\lambda},\ \frac{9}{4\lambda},\ \text{etc.}$$

λ étant la longueur d'ondulation lumineuse dans l'air; ou, si l'on prend pour unité le quart de cette longueur, les épaisseurs de la lame d'air correspondant aux maxima et minima de la lumière réfléchie seront représentées par les nombres suivants :

Anneaux obscurs.....	0, 2, 4, 6, 8, 10, etc.
Anneaux brillants.....	1, 3, 5, 7, 9, 11, etc.

Cette unité, ou le quart d'une ondulation lumineuse, est précisément la longueur de ce que Newton appelle les accès des molécules lumineuses : ainsi, en multipliant par quatre les mesures qu'il a données pour les sept principales espèces de rayons simples, on obtiendra les longueurs correspondantes de leurs ondulations. On trouve de cette manière les mêmes résultats qu'en déduisant les longueurs d'ondulation de la mesure des franges produites par deux miroirs. » (FRESNEL.)

1582. Nous avons vu précédemment, en parlant de la réfraction, que la vitesse de la lumière, en passant d'un milieu dans un autre, varie dans le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction; mais les longueurs d'ondulation varient dans le même rapport que ces vitesses : par conséquent, lorsque l'on remplacera la lame d'air renfermée entre les deux verres par un liquide quelconque, les épaisseurs correspondant aux mêmes anneaux varieront dans le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction pour le passage de la lumière de l'air dans le liquide. C'est précisément la loi de Newton.

1583. Quand les rayons incidents sont inclinés à la normale, on retombe encore exactement sur la formule que Newton avait déduite de l'observation.

On voit facilement, à l'inspection de la fig. 922, qu'en désignant par δ la différence des chemins parcourus par les rayons réfléchis à la première et à la deuxième surface, par e l'épaisseur de la lame d'air, et par i l'angle d'incidence, on a

$$\delta = 2cd - gf,\quad cd = \frac{e}{\cos i},\quad gf = ge\sin i = bd\sin i = 2bo\sin i = 2e\tang i\sin i;$$

d'où
$$\delta = 2e\left(\frac{1}{\cos i} - \frac{\sin^2 i}{\cos i}\right) = 2e\cos i.$$

Ainsi, en désignant par e et e' les épaisseurs de la lame d'air qui réfléchissent le même anneau, sous l'incidence perpendiculaire et sous l'incidence i, on aura

$$2e = 2e' \cos i, \quad \text{ou} \quad e' = \frac{e}{\cos i}.$$

Si la lame mince était formée d'une substance quelconque, ayant n pour indice, on aurait

$$\delta = 2e\left(\frac{n - \sin^2 i}{n \cos i}\right),$$

i étant toujours l'incidence à la seconde surface de la lame mince.

La formule à laquelle nous venons d'être conduits est celle de Newton pour des inclinaisons qui ne dépassent pas une certaine limite; au delà elle cesse d'être exacte; cette anomalie tient probablement à ce que les lois ordinaires de la réfraction, d'après lesquelles la formule a été calculée, éprouvent quelques modifications dans le passage très-oblique des rayons entre deux surfaces aussi rapprochées.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que les anneaux colorés résultaient seulement de l'interférence des rayons réfléchis à la première surface de la lame avec les rayons réfléchis une seule fois à la seconde surface. Cependant il y a des rayons qui sortent après 2, 3, 4, etc., réflexions à la seconde surface. Mais il faut remarquer que, quand la lame mince a une courbure prononcée, ces réflexions multiples font varier rapidement la direction des rayons émergents, qui alors n'exercent qu'une action très-faible sur le rayon réfléchi à la première surface, et peuvent, par conséquent, être négligés; mais, quand la courbure de la lame est extrêmement petite ou nulle, il faut nécessairement y avoir égard, et c'est une chose très-facile. Supposons d'abord que le double de l'épaisseur de la lame mince soit égal à un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation : il est évident que les rayons réfléchis à la seconde surface seront tous en retard les uns sur les autres d'un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, qu'ils seront tous d'accord, et qu'ils interféreront tous de la même manière avec les rayons réfléchis à la première surface, et, par conséquent, que l'intensité de la lumière réfléchie dépendra uniquement de la différence de l'intensité de ce dernier rayon et de la somme des intensités des rayons réfléchis. Si, au contraire, le double de l'épaisseur de la lame mince était égal à un nombre impair de $\frac{\lambda}{2}$, les rayons qui auront éprouvé un nombre impair de réflexions seront en discordance, et ceux qui en auront éprouvé un nombre pair seront d'accord : alors, comme la somme des intensités

des premiers l'emporte sur celle des derniers, l'effet résultant sera toujours dans le même sens que celui qui résulte de l'interférence du rayon qui n'a éprouvé qu'une seule réflexion.

1584. On explique très-bien d'après ces principes, pourquoi le centre des anneaux réfléchis produits sous l'incidence perpendiculaire est parfaitement noir, quand les deux lentilles sont en contact. En effet, dans ce cas, en regardant l'épaisseur de la lame comme infiniment petite, même relativement à la longueur d'ondulation, les rayons qui sortent après un nombre quelconque de réflexions sur la seconde surface de la lame mince sont tous d'accord, et la tache centrale sera parfaitement noire, si la somme des vitesses d'ondulation des rayons réfléchis à la seconde surface est égale à la vitesse d'ondulation du rayon réfléchi à la première surface; or, le calcul établit la plus parfaite égalité entre les vitesses de ces deux faisceaux.

Nous avons vu [147] que, si une masse élastique m, animée d'une vitesse v, vient choquer une masse m' également élastique, mais en repos, après le choc la vitesse de la première est

$$\frac{m-m'}{m+m'}v, \qquad (a)$$

et celle de la seconde est $$\frac{2m}{m+m'}v. \qquad (b)$$

En assimilant ces phénomènes à ceux qui se passent entre les lames infiniment minces des éthers des deux corps en contact, on voit que, v représentant l'amplitude des vibrations de la lumière incidente, m et m' les densités de l'éther dans le premier et le second milieu, l'amplitude des vibrations du rayon réfléchi par la première surface sera représentée par la formule (a), et la vitesse de vibration du rayon transmis, par la formule (b). Cela admis, posons pour plus de simplicité

$$\frac{m-m'}{m+m'}=r, \qquad \frac{2}{m+m'}=e;$$

et représentons la vitesse de vibration du rayon incident par l'unité.

Lorsque le rayon passera de l'air dans le verre, on obtiendra évidemment les vitesses des rayons réfléchis et transmis en changeant m en m', et m' en m: par ce changement la vitesse du rayon réfléchi reste la même, au signe près; mais celle du rayon transmis, qui était me dans le premier cas, devient $m'e$ dans le second.

Suivons maintenant la marche du rayon transmis em. Ce rayon, arrivé à la seconde surface de la lame, donne un rayon réfléchi dont la vitesse est $-emr$; de retour à la première surface, le rayon qui en sort a une vitesse $-emrem'=(-mm'e^2r^3)$, et le rayon réfléchi a une vitesse emr^2; ce

rayon réfléchi, à la seconde surface, devient $-emr^3$, qui produit un nouveau rayon émergent $-emr^3 \times m'e = (-mm'e^2r^3)$, et un rayon réfléchi emr^4; ce dernier, après une nouvelle réflexion, qui réduit sa vitesse à $-emr^5$, produit un nouveau faisceau émergent $-emr^5 \times m'e = (-mm'e^2r^5)$, et ainsi de suite : alors la somme des vitesses des rayons réfléchis à la seconde surface est

$$-mm'e^2r(1+r^2+r^4+, \text{etc....}).$$

La progression ayant r^2 pour raison, renfermant un nombre infini de termes, et r étant une fraction plus petite que l'unité, on trouve que la somme de cette progression est $1 : (1-r^2)$. Alors, en substituant pour e et r leurs valeurs, on trouve $-\frac{m-m'}{m+m'}$ pour résultat final, c'est-à-dire exactement la vitesse du rayon réfléchi à la première surface, mais avec un signe contraire.

La perte d'une demi-ondulation à la réflexion sur la seconde surface d'un milieu réfringent a été démontrée par des expériences directes (M. Babinet, *C. R.*, t. VIII).

1585. Quant aux anneaux qu'on observe par transmission, ils résultent, comme nous l'avons déjà dit, de l'interférence des rayons transmis directement avec ceux qui ne l'ont été qu'après avoir éprouvé deux réflexions consécutives dans la lame mince. En effet, les différences de marche des rayons qui interfèrent après la transmission sont alors exactement les mêmes que celles des rayons qui interfèrent après la réflexion; mais, comme dans le premier cas, la double réflexion fait disparaître le changement de signe de la vitesse du rayon réfléchi, il s'ensuit que les effets produits par l'interférence dépendent uniquement de la différence des chemins, et, par conséquent, que les deux ordres d'anneaux sont complémentaires. La teinte si faible des anneaux transmis résulte de la faible intensité des rayons qui sortent après deux réflexions successives.

1586. Le système des ondulations explique avec une extrême facilité les anneaux réfléchis à centres blancs dont nous avons parlé [1415], et qui se forment quand la lame mince est placée entre deux milieux, l'un plus, l'autre moins réfringent. En effet, dans ce cas, les réflexions à la première et à la seconde surface de la lame mince ayant lieu dans les mêmes circonstances, c'est-à-dire quand la lumière rencontre un milieu qui est plus réfringent ou moins réfringent, il n'y a plus lieu d'ajouter une demi-longueur d'ondulation à la différence des chemins parcourus par les ondes qui interfèrent, et, par conséquent, les anneaux doivent être complémentaires de ce qu'ils sont dans les cas ordinaires, et, par suite,

le centre doit être coloré dans une lumière homogène, et blanc dans la lumière blanche.

La fig. 1043 représente l'appareil imaginé par M. Soleil pour produire les anneaux dont il est question. Il se compose d'un prisme placé au-dessus d'une plaque à faces parallèles, et que l'on peut comprimer à l'aide de deux vis; le prisme est en flint-glass, la plaque en crown-glass; en mettant une goutte d'eau ou d'essence de laurier sur la plaque, substances dont les indices sont l'un plus grand, l'autre plus petit que ceux du prisme et de la plaque, on obtient des anneaux à centre noir; mais, avec de l'essence de girofle ou de sassafras, dont l'indice est intermédiaire entre ceux de la plaque et du prisme, on obtient des anneaux à centre blanc. En employant une plaque formée de deux autres réunies latéralement, l'une en flint-glass, l'autre en crown-glass, et de l'essence de girofle, on obtient deux demi-systèmes d'anneaux, l'un à centre blanc, l'autre à centre noir.

1587. *Anneaux colorés produits par des plaques épaisses.* Les anneaux dont il est question, et dont nous avons décrit toutes les particularités [1416], s'expliquent aussi très-facilement dans le système des ondulations. En effet, lorsqu'un faisceau très-délié de lumière homogène vient rencontrer perpendiculairement la première surface d'une glace étamée, le rayon qui pénètre normalement dans le verre, à cause de l'imperfection du poli de la surface, est environné d'un faisceau de rayons d'une faible intensité, et d'autant plus petite qu'ils s'éloignent davantage de la normale. Ces rayons disséminés, réfléchis à la seconde surface, émergent par la première dans un cône plus ouvert; le rayon principal, de retour à la première surface, produit encore de nouveaux rayons disséminés autour de lui, et c'est l'interférence de ces derniers avec les premiers qui donne naissance aux franges qu'on observe. Il est facile de voir que les rayons de ces deux systèmes ont parcouru sensiblement le même chemin, et que la différence, très-petite, augmente avec la distance de leurs points de concours à l'axe du faisceau. M. W. Herschel a retrouvé par le calcul toutes les circonstances que présentent ces phénomènes.

1588. M. Brewster a produit des bandes colorées avec des plaques épaisses par une disposition que nous rapporterons. Supposons que A et B (fig. 923) représentent deux plaques de la même substance à faces parallèles et d'égale épaisseur : si, les plaques étant légèrement inclinées, on regarde un objet lumineux au travers,

par exemple la flamme d'une bougie, on voit, outre l'image directe, une image plus faible déviée du côté de l'angle du prisme d'air, et cette image est couverte de bandes irisées d'autant plus larges que l'angle des deux plaques est plus petit. Avec une lumière homogène, l'image latérale est traversée par des bandes noires. Si l'appareil des deux glaces est fixé à l'extrémité d'un tube noirci de 20 à 30 centimètres de longueur, terminé à l'autre extrémité par un orifice, en regardant le ciel on aperçoit sur l'image latérale de très-belles franges. L'image latérale provient des rayons qui émergent après avoir éprouvé deux réflexions, et les franges proviennent de l'interférence de ceux de ces rayons qui, ayant traversé le même nombre de fois les lames de verre et le prisme d'air, diffèrent cependant de marche, suivant le point où ils ont traversé le système pour arriver à l'œil de l'observateur. En désignant par t l'épaisseur commune des lames A et B, par i l'épaisseur de la lame d'air, il est facile de voir que les rayons désignés par 1, 2, 3, 4, ont traversé des épaisseurs $2t+3i$, $4t+3i$, $4t+3i$, et $6t+3i$; ainsi, le deuxième et le troisième sont les seuls qui pourront interférer et produire des franges, les différences de marche des autres étant trop considérables.

On obtient aussi des franges analogues, et qui ont la même origine, au moyen d'un petit appareil formé de deux douilles qui s'emboîtent, et dont chacune porte une plaque à faces parallèles fixée sur son fond sous le même angle; en tournant une des douilles, on peut placer les glaces parallèlement ou leur donner une inclinaison quelconque.

Diffraction.

1589. Le docteur Yong avait expliqué les phénomènes de diffraction par l'interférence des rayons directs avec les rayons réfléchis contre les bords des corps ou des orifices. Cette explication satisfait à certains phénomènes; mais il en est pour lesquels les résultats de la théorie sont en contradiction manifeste avec l'observation. D'ailleurs, dans cette théorie, l'épaisseur, la nature et le degré de poli des corps devraient avoir une grande influence, tandis que l'expérience démontre qu'elle est nulle.

1590. L'explication de la diffraction repose sur le principe des interférences, que nous avons développé avec beaucoup de détails, et sur le principe d'Huyghens qu'on peut énoncer ainsi : le mouvement en un point quelconque d'une onde peut être considéré comme

la résultante des petits mouvements élémentaires qu'y enverraient en même temps tous les points de l'onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures : car chaque point d'une onde est un centre d'ébranlement qui tend à propager le mouvement dans tous les sens; et, en vertu du principe de mécanique connu sous le nom de *principe de la superposition des petits mouvements*, quand des ondes partent de différents centres d'ébranlement, le mouvement imprimé à une molécule du fluide est égal à la résultante des petits mouvements qui sont produits sur cette molécule par chacun des centres d'ébranlement considéré séparément. Le mouvement en retour est détruit par la nature même du mode de communication [397], et les mouvements latéraux se détruisent mutuellement, mais seulement quand l'onde n'est point interceptée.

Mais, comme chaque point de l'onde est ébranlé dans une direction déterminée, le mouvement propagé dans cette direction aura plus d'intensité que dans toute autre, et cette intensité ira en décroissant à mesure que les directions de propagation s'éloigneront davantage de la normale à la surface de l'onde, suivant une loi inconnue, mais que Fresnel suppose très-rapide, du moins pour la lumière. Voici maintenant la méthode que Fresnel a employée pour calculer dans tous les cas les effets produits par la diffraction. Dans tous, les ondes sont partiellement interceptées. Lorsque les franges sont produites par un corps indéfini dans un sens, il n'y a qu'une moitié de chaque onde qui dépasse l'écran; lorsque les franges sont formées dans l'ombre d'un corps étroit, les ondes sont seulement diminuées de l'épaisseur du corps; et enfin, quand les franges sont formées par une ou plusieurs fentes, les ondes ont seulement la largeur des fentes. Alors Fresnel a calculé les effets produits à une distance donnée par tous les points libres des ondes, et les résultats du calcul se sont toujours trouvés parfaitement d'accord avec l'expérience.

Nous n'entrerons pas dans tous les détails des calculs par lesquels Fresnel a déterminé les effets produits par la diffraction (*A. C. et P.*, t. XI); nous nous contenterons d'expliquer les apparences observées par de simples considérations géométriques; nous supposerons que le corps lumineux est réduit à une fente étroite, et alors les ondes seront cylindriques; nous supposerons, en outre, que la lumière est homogène.

1391. *Franges produites par un écran indéfini.* Soient MN

(fig. 924) un écran plan, indéfini, parallèle à la ligne lumineuse qui se projette en C, MD la base de l'onde lumineuse cylindrique qui rencontre le bord de l'écran : cherchons la quantité de lumière qui parviendra en un point P quelconque situé à une grande distance par rapport à la longueur d'ondulation ; menons la ligne PC et divisons l'arc DM, à partir du point A, en parties inégales Am, mm', $m'm''$, An, nn', $n'n''$, etc., de manière que la différence des distances des points de division consécutifs au point P soit égale à la moitié d'une longueur d'ondulation, et imaginons que ces parties de l'arc MD soient elles-mêmes divisées en un même nombre très-grand d'éléments. Cela posé, représentons par 2 l'intensité de la lumière qui éclairerait le point P si l'écran n'existait pas ; il est évident que, dans une position quelconque du point P, la quantité de lumière qui y arrivera sera composée de celle qui est envoyée par la demi-onde AD, qui est égale à 1, et de celle qui sera envoyée par l'arc AM. Si ce dernier arc renferme une seule division les mouvements de ses différents éléments seront d'accord avec ceux des éléments correspondants de la première division de l'autre côté du point A, et les effets s'ajouteront ; mais, si l'arc AM renferme deux divisions, les effets produits par les éléments correspondants se détruiront sensiblement, et la lumière supportée au point P par l'onde totale MD sera plus petite que dans le premier cas ; en continuant à supposer l'arc AM toujours plus grand d'une division, il est facile de voir qu'il y aura accroissement de lumière quand l'arc AM renfermera un nombre impair de divisions. Ainsi, en plaçant un écran à une certaine distance, on devra y voir des lignes alternativement brillantes et obscures.

Il est même facile de déduire de là les trajectoires suivant lesquelles les franges se propagent : car, par exemple, pour les franges obscures du premier ordre, la différence des distances du point P aux points A et M étant égale à deux demi-longueurs d'ondulation, la différence des distances du même point P aux points C et M sera plus grande de CA, et comme cette dernière longueur est constante, on voit que la frange se propagera suivant un cylindre hyperbolique dont la base est une hyperbole ayant ses foyers aux points C et M.

En désignant CM par a, par d la différence des distances du point P aux points M et A, par x la distance du point P au point o milieu de CM comptée sur CL, par y la distance de ce point au bord de l'ombre géométrique, et enfin par A et B les deux axes de l'hyperbole, on aura, en négligeant d^2,

$$2A = a - d, \quad A^2 = \frac{a^2 - 2ad}{4} = \frac{a(a-2d)}{4};$$

$$B^2 = \frac{a^2}{4} - \frac{a(a-2d)}{4} = \frac{ad}{2};$$

et, en substituant ces valeurs de A et de B dans l'équation de l'hyperbole,

$$2a(a-2d)y^2 - 4adx^2 = -a(a-2d)ad.$$

Mais, comme cette courbe est rapportée à son centre situé au milieu de CM, si l'on veut transporter les axes au point M, il faudra faire

$$x = x' + \frac{1}{2}a;$$

et l'équation, ainsi transformée et résolue par rapport à x, donne, en négligeant les termes qui contiennent d^2 et d, par rapport à a,

$$y = 2\sqrt{\frac{dx'(x'+a)}{2a}}.$$

Pour obtenir les distances des centres des franges obscures successives au bord de l'ombre géométrique, il suffira de remplacer, dans la valeur de y, d successivement par λ, 2λ, 3λ, etc. On voit facilement d'après cela que les franges ne sont point à égale distance, et qu'elles se rapprochent les unes des autres d'autant plus qu'elles s'éloignent davantage des bords de l'ombre géométrique.

Les maxima et les minima d'intensité des franges iront en diminuant à mesure qu'ils s'éloigneront de l'ombre géométrique, car les divisions efficaces qui sont toujours voisines du point M ont des longueurs d'autant plus petites, et rayonnent d'autant plus obliquement, que le point P s'éloigne davantage.

La lumière qui se propage dans l'intérieur de l'ombre géométrique ne présentera ni maxima ni minima d'intensité; mais elle décroîtra rapidement et d'une manière continue. En effet, chaque point K de l'ombre reçoit de la lumière d'une demi-onde MD, et si, pour chaque point, on divise cette demi-onde, à partir du point M, en arcs tels, que la différence de distance des points de division au point K soit égale à une demi-longueur d'ondulation, la quantité de lumière qu'enverrait séparément au point K une des divisions diminuerait à mesure qu'elle serait plus éloignée du point A, à cause de l'accroissement d'obliquité et de la diminution de longueur; par conséquent, la lumière de chacune d'elles pourra être considérée comme composée de deux parties, l'une détruite par une partie de la division précédente, l'autre par une partie de la

division suivante : alors le point M sera éclairé par une partie seulement de la première division; ainsi l'intensité de la lumière décroîtra rapidement et d'une manière continue à mesure que le point K s'éloignera du point L.

1592. D'après la manière dont Fresnel a envisagé la diffraction, on n'a point égard au plus ou moins d'épaisseur des bords de l'écran, mais seulement à la partie de l'onde qui peut envoyer des rayons élémentaires aux points dont on calcule l'intensité; et le corps opaque ne remplit d'autres fonctions que de supprimer une partie de l'onde : voilà pourquoi le résultat du calcul est indépendant de la nature de ce corps, de sa masse et de l'épaisseur de ses bords. Cependant si leur surface était trop grande, on ne pourrait plus considérer l'onde primitive au moment où elle les quitte comme n'ayant reçu aucune modification sensible, et il faudrait tenir compte dans le calcul des petites franges qu'aurait déjà fait naître son passage contre les parties antérieures. Mais tant qu'ils ont peu d'épaisseur, ou une courbure prononcée, les petites franges ainsi produites sont si étroites qu'on peut les négliger et regarder l'onde émergente comme ayant une intensité uniforme dans toute son étendue au moment où elle quitte l'écran, surtout si l'on calcule les intensités de la lumière à une distance un peu grande de ce corps.

1593. Il est important de remarquer que l'affaiblissement si rapide de la lumière dans l'ombre géométrique résulte du décroissement rapide de la lumière dans des directions qui s'écartent de plus en plus de la normale à la surface de l'onde et de la petitesse des longueurs d'ondulation. S'il n'en était pas ainsi, la lumière se propagerait dans l'ombre à une distance d'autant plus grande que la loi de décroissement serait moins rapide et les longueurs d'ondulation plus grandes; et, si tous les points de l'onde tendaient à propager également la lumière dans tous les sens, il est évident que l'ombre géométrique serait fortement éclairée. C'est là, sans aucun doute, la raison pour laquelle le son se propage avec une faible diminution d'intensité derrière les obstacles placés perpendiculairement à la direction de la transmission, et pourquoi les ondes formées à la surface de l'eau se reforment complétement derrière un obstacle. Les lois des variations d'intensité du mouvement dans des directions obliques ou normales des ondes ne sont point connues.

1594. *Franges formées par une ouverture très-étroite.* Lorsque

l'écran est seulement percé d'une fente longitudinale très-étroite, d'une longueur indéfinie, il faut chercher pour les différents points éclairés par le faisceau lumineux la résultante de toutes les ondes élémentaires qui émanent de la partie de l'onde primitive comprise dans la largeur de cette ouverture; mais nous pouvons, par des considérations géométriques très-simples, déterminer la disposition de ces franges.

Il peut se former ou des franges dans l'ombre ou des franges dans la partie éclairée, ou en même temps des franges extérieures et intérieures. Nous allons essayer de faire comprendre la formation de ces différentes espèces de franges. Soient (fig. 925) C le point lumineux, AB l'orifice, EF la projection conique de l'orifice sur l'écran XY. Occupons-nous d'abord des franges intérieures; supposons que l'écran XY ait été placé de manière que les différences de distance du point P aux points A et M et aux points B et M soient exactement d'une demi-ondulation : alors toutes les ondes élémentaires parties des différents points de AMB apporteront au point P des mouvements de même signe, et concourront à en augmenter l'éclat. La même chose aura évidemment lieu si l'on suppose que l'écran s'éloigne de l'ouverture, puisque les différences des distances des points P', P'', aux points A et M, B et M, deviennent plus petites qu'une demi-ondulation. Prenons maintenant dans la projection de l'ouverture sur l'écran XY un point O qui soit tel que OB — OA soit égal à une ondulation entière; en prenant un point N qui divise l'arc AB en deux parties telles que l'on ait

$$OB - ON = ON - OA = \frac{1}{2\lambda},$$

il est évident que les deux arcs AN et NB enverront au point O des mouvements de signes contraires, et que le point O sera le centre d'une bande obscure. De même, si l'on prenait un point L, pour lequel on aurait

$$LB - LA = \frac{3}{2\lambda},$$

on pourrait diviser l'arc AB en trois parties telles que, les différences des distances des points de division au point L fussent d'une demi-ondulation : alors le point L serait le centre d'une bande brillante. Ainsi il y aura de chaque côté du point P des bandes sombres et brillantes symétriquement placées par rapport à l'axe CP. Il est facile de voir que ces bandes se rapprocheront des bords de l'ombre à mesure que l'écran s'éloignera, et qu'elles disparaîtront

complétement lorsque l'écran aura une position X"Y", telle que, $QB - QA = \frac{1}{2\lambda}$. Mais si nous rapprochons l'écran XY de l'orifice, le point P sera alternativement le centre d'une bande brillante et d'une bande obscure. En effet, l'écran étant plus rapproché, la différence des distances PB — PM sera toujours $>$ que $\frac{1}{2\lambda}$; quand cette différence sera égale à un nombre pair de demi-ondulations, les mouvements provenant des arcs AM et MB se détruiront séparément : car, si $2\frac{n\lambda}{2}$ représente la différence en question, on pourra diviser l'arc MB et l'arc MA chacun en $2n$ parties, dont les différences de distance au point P soient de $\frac{1}{2\lambda}$: alors toutes les ondes élémentaires parties des différents points de deux arcs consécutifs se détruiront sensiblement. Mais si la différence des distances PB et PM était d'un nombre impair de demi-ondulations, on pourrait diviser l'arc MB en un nombre impair d'arcs, dont les effets se détruiraient sensiblement, à l'exception d'un seul.

Il est facile de voir, d'après ce qui précède, que, si l'on prend dans l'ombre géométrique des points o, o', o'', qui soient tels que les différences des distances de chacun de ces points aux points A et B soient égales à un nombre pair de demi-ondulations, ces points seront les centres de bandes obscures; et que, si l'on prend une série de points l, l', l'', etc., pour lesquels les différences des distances aux points A et B soient d'un nombre impair de demi-ondulations, ces points seront des centres de bandes brillantes. Si maintenant nous remarquons que les conditions qui déterminent la formation des franges intérieures et extérieures sont les mêmes, et que pour les franges d'un même ordre, formées sur un écran dont la distance varie, les différences des distances aux points A et B sont constantes; il en résulte que les franges se propagent suivant des hyperboles dont les points A et B sont les foyers. La distance AB étant toujours extrêmement petite, on peut considérer ces courbes comme se confondant avec leurs asymptotes.

Pour obtenir les équations des lignes suivant lesquelles les franges se propagent sensiblement, représentons par A et B les axes de l'hyperbole, par d la différence de longueur des rayons vecteurs, et par c la largeur de la fente, nous aurons

$$2A = d, \text{ et } A^2 + B^2 = \frac{c^2}{4}; \text{ d'où } A = \frac{d}{2}; \text{ et, en négligeant } \frac{d^2}{4}, B = \frac{c}{2},$$

l'équation de l'asymptote, en prenant l'axe imaginaire pour l'axe des x, est alors

$$y = \frac{A}{B}x = \frac{d}{c}x.$$

Pour les franges obscures, il faudra remplacer d par un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, et pour les franges brillantes par un nombre impair : il est alors facile de voir que le franges sont également distantes, et que leur largeur est proportionnelle à la distance du micromètre à la fente, à la longueur d'ondulation, et en raison inverse de la largeur de l'orifice.

L'expérience confirme parfaitement ces résultats théoriques, dans les circonstances où l'approximation que nous avons employée est permise.

Le docteur Yong avait expliqué les phénomènes dont il s'agit par l'interférence des rayons réfléchis sur les bords de l'orifice; mais il est facile de voir que les résultats de l'expérience sont en opposition complète avec ceux qui résulteraient de cette explication, car les franges brillantes devraient occuper la place des franges obscures, et réciproquement.

1595. *Franges produites par deux ouvertures.* Lorsque l'écran est percé de deux fentes très-fines, au travers desquelles passent les rayons émanés d'une ligne lumineuse placée au delà de cet écran, parallèlement aux fentes et à égale distance de chacune d'elles, les franges qui se forment doivent évidemment être disposées de la même manière que celles qui sont produites par un même rayon réfléchi sur deux miroirs légèrement inclinés l'un sur l'autre. En effet, les chemins parcourus jusqu'aux fentes étant égaux, il suffira de compter les chemins parcourus par les rayons à partir des fentes pour avoir leurs différences de marche. Ainsi, tout ce que nous avons dit pour le cas de deux miroirs pourra s'appliquer ici, du moins tant que chaque fente sera assez étroite pour être considérée comme un seul centre d'ondulation, relativement aux rayons infléchis qu'elle envoie.

En désignant par c la distance des deux fentes, et conservant la notation de l'article précédent, on est conduit à la même formule approximative, $y = xd : c$; mais d est égal à un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation pour les franges brillantes, et à un nombre impair pour les franges obscures.

1596. *Franges produites par un corps très-étroit.* Lorsque l'écran, au lieu de s'étendre indéfiniment d'un côté, est assez étroit pour que la lumière infléchie jusqu'au milieu de son ombre ne soit pas trop affaiblie par le décroissement rapide d'intensité que pro-

duit l'obliquité des rayons, il faut tenir compte à la fois dans le calcul de ceux qui viennent des deux côtés, et chercher pour chaque point de l'ombre la résultante générale de toutes les ondes élémentaires qu'y envoient les divers points des deux parties de l'onde primitive situées à droite et à gauche de l'écran. On trouve de cette manière que l'intérieur de l'ombre doit être divisé par une série de bandes obscures et brillantes, de largeur à peu près égale, et dont les positions diffèrent très-peu de celles qu'on déduirait en considérant les extrémités du corps comme des centres de rayonnement. Mais, quand le corps opaque est très-étroit, et le micromètre assez éloigné de ce corps pour que les bandes observées soient très-voisines des bandes extérieures, alors les calculs faits par la méthode que nous avons exposée précédemment indiquent, comme l'expérience, que cette méthode n'est plus exacte. Les résultats du calcul représentent aussi avec une fidélité remarquable les altérations singulières qu'éprouvent souvent dans ce cas les franges extérieures, lorsque les autres sortent de l'ombre, et viennent en quelque sorte se mêler avec elles.

Si les franges que l'on considère sont éloignées des bords de l'ombre géométrique, on peut trouver leur position par des considérations très-simples. Soit AG (fig. 926) un corps opaque, assez étroit pour qu'on puisse distinguer des franges dans l'intérieur de son ombre à la distance AB; soient C le point éclairant, BD le carton blanc sur lequel on reçoit les franges; concevons la partie AM de l'onde primitive divisée en petits arcs Am, mm', $m'm''$, etc., de façon que les lignes menées du point P, situé dans l'intérieur de l'ombre, à deux points de division consécutifs, diffèrent d'une demi-ondulation : toutes les petites ondes envoyées en P par les éléments de chacun de ces arcs seront en discordance complète avec les ondes élémentaires qui émanent des parties correspondantes des deux arcs entre lesquels il est compris; mais les arcs enverront au point P des quantités de lumière qui décroîtront rapidement, à mesure qu'ils s'éloignent du point A. Alors on pourra considérer la lumière de chacun d'eux comme composée de deux parties : l'une serait détruite par une partie de la lumière de la division précédente, l'autre par une partie de la lumière de la division suivante. Ainsi, il ne restera qu'une partie de la lumière émise par l'arc mA, et l'onde résultante répondra à peu près au milieu s de mA. La même chose ayant lieu relativement à l'autre partie GN de l'onde incidente, le degré d'accord ou de

discordance entre les vibrations lumineuses qui se manifestent au point P se trouve déterminé par la différence de longueur entre les deux rayons *s*P et *t*P qui émanent des milieux des arcs A*m* et G*n*, ou, ce qui revient au même, par la différence entre les rayons AP et GP partis des bords mêmes du corps opaque. Ainsi, lorsque les franges intérieures que l'on considère sont suffisamment éloignées des bords de l'ombre géométrique, on peut, sans erreur sensible, les considérer comme résultant des interférences des ondes qui ont leur centre sur les bords mêmes du corps opaque. Mais, à mesure que le point P se rapproche de B, l'arc A*m* devient plus grand par rapport à l'arc *mm'*, l'arc *mm'* plus grand par rapport à l'arc *m'm''*, etc; et de même, dans l'arc *m*A, les éléments qui avoisinent le point A deviennent sensiblement plus grands que ceux situés vers le point *m*, et répondant à des différences égales de chemins parcourus. Il en résulte que le rayon efficace *s*P ne doit plus être la moyenne entre les rayons extrêmes *m*P et AP, mais se rapprocher davantage de la longueur de celui-ci. De l'autre côté du corps opaque, au contraire, la différence entre les rayons GP et le rayon efficace *t*P approche d'autant plus d'être exactement égale à un quart d'ondulation, que le point P s'éloigne davantage de D. Ainsi la différence des chemins parcourus varie plus rapidement entre les rayons efficaces *s*P et *t*P qu'entre les rayons AP et GP : par conséquent, les franges qui avoisinent le point B doivent être un peu moins éloignées du centre de l'ombre que ne l'indique la construction fondée sur la première hypothèse.

1597. *Franges produites par une ouverture circulaire ou un écran de même forme.* Dans le cas dont il s'agit, il faut déterminer l'influence des ondes élémentaires qui partent de tous les points de l'orifice ou de tous les points du contour de l'écran. Fresnel a retrouvé par ses calculs toutes les circonstances observées, et que nous avons décrites précédemment [1427].

Dans ce qui précède, nous avons supposé la lumière homogène; il est facile d'en déduire ce qui arriverait dans la lumière blanche, ainsi que les phénomènes analogues produits par la réflexion [1429].

1598. *Franges produites par les réseaux.* Les phénomènes que présentent les réseaux, que nous avons décrits précédemment avec beaucoup de détails [1430], s'expliquent avec une extrême facilité dans le système des ondulations, comme M. Babinet l'a reconnu le premier. Soient MN (fig. 927) un réseau éclairé par une fente

lumineuse S parallèle aux raies du réseau, C la position de l'œil de l'observateur; nous supposerons que CS soit un plan perpendiculaire au réseau, qui passe par le milieu d'une raie obscure, et que le foyer de lumière soit assez éloigné pour que le plan du réseau se confonde avec une onde cylindrique. Divisons le réseau, à partir du point A, en parties telles que la différence des distances de deux divisions consécutives au point C soit égale à une demi-longueur d'ondulation : il est évident, d'après ce qui précède, que, si le réseau n'existait pas, les effets produits par deux divisions consécutives se détruiront sensiblement, et que l'œil ne recevrait que la moitié de la lumière émanée de la première division. Si maintenant nous considérons le réseau, il existera un intervalle transparent et obscur dont l'étendue coïncidera sensiblement avec deux divisions successives; alors ces deux divisions, qui, dans l'absence du réseau, produisaient des ondes qui se détruisaient par leur interférence, enverront de la lumière au point C. Il en sera évidemment de même quand l'intervalle d'une raie obscure et d'une raie brillante occupera 2 divisions, 4 divisions, et ainsi de suite : par conséquent, on devra apercevoir des franges brillantes successives, et leur position ne dépendra en aucune manière de la largeur relative des raies obscures et transparentes, mais seulement de la somme de ces largeurs; ce qui est parfaitement d'accord avec l'observation de Frauhenhofer.

Toutes les autres lois observées par Frauhenhofer résultent également de cette explication. En effet, joignons les extrémités d et f de l'élément du réseau correspondant à la première raie avec le point C, où se trouve placé l'œil de l'observateur, et du point d abaissons sur Cf la perpendiculaire dp : les triangles dfp et ACf seront semblables, et nous aurons $df : fp :: Cf : Af$, ou $s : \lambda :: Cf : Af :: 1 : \sin d$. Ainsi $\sin d = \lambda : s$, et pour la frange du n^e ordre, sin D, ou $D = n\lambda : s$, qui est exactement la formule déduite de l'expérience. Il résulte aussi de là que la frange qui provient de l'élément du réseau pour lequel la différence des chemins est égale à deux ondulations devrait disparaître, si la raie obscure avait une largeur égale à celle de la raie transparente; il en serait de même pour la troisième frange, si la largeur d'une des raies était le tiers de l'espace occupé par les deux raies; et enfin pour la frange de l'ordre n, si la largeur d'une des deux raies était égale à $\frac{1}{n}$ de la somme des largeurs des deux raies; ce qui est encore parfai-

tement d'accord avec l'expérience. Nous devons dire cependant que, pour que l'explication précédente fût complète, il serait indispensable de faire le calcul des effets produits par tous les rayons qui traversent le réseau : car, dans ce que nous avons dit précédemment, on ne voit pas nettement pourquoi les éléments du réseau qui sont compris entre ceux que nous avons considérés n'envoient pas de lumière. La déviation d pouvant se mesurer avec une très-grande précision [1432], on en déduirait facilement les valeurs de λ pour les différentes couleurs.

En terminant la diffraction, nous répondrons à une objection qu'on a souvent reproduite contre le système des ondulations. Nous avons dit que, si l'on recevait les franges sur un verre dépoli, elles avaient les mêmes apparences que si on les regardait directement ou avec une loupe. Or, on a prétendu qu'il ne pouvait pas en être ainsi, attendu que les rayons, en se propageant directement dans l'œil, suivent des chemins différents et éprouvent des différences de marche qui dépendent de leurs directions primitives et des milieux qu'ils traversent. Pour répondre à cette objection, remarquons d'abord que, quand des rayons lumineux qui se propagent suivant des lignes courbes quelconques viennent rencontrer la première surface d'une lentille, les rayons convergent au même point que si les rayons incidents étaient rectilignes et dirigés suivant la dernière tangente à leur trajectoire au point d'incidence. Cela posé, considérons une lentille placée dans un faisceau de franges, se propageant suivant des directions quelconques, l'intersection de la première surface de la lentille et du faisceau renfermera des bandes dans lesquelles l'éther sera alternativement en vibration et en repos, et dans les premières l'intensité et la direction du mouvement en chaque point seront déterminées par la direction et l'intensité de la résultante des petits mouvements émanés des différents centres d'ébranlement. Alors ces mouvements se propageront à travers la lentille et produiront à une certaine distance derrière, sur un écran, une image semblable à celle qu'on verrait sur la première surface de la lentille, si elle était dépolie; mais elle sera renversée, et, à ce foyer, il ne se produira pas de franges par des interférences directes, parce que, quelque grands que soient les rayons de courbure de la lentille, les différences de distance, en ondulations, d'un point du plan focal aux points lumineux seraient trop grandes. Ainsi, quand on regarde directement des franges à l'œil nu, celles qu'on voit ne sont pas celles qui se forment directement sur la ré-

tine, mais celles qui se produisent sur la cornée transparente, et qui vont former ensuite leur image sur la rétine par réfraction.

Polarisation de la lumière.

1599. Nous avons dit, en commençant l'exposition du système des ondulations, que Fresnel avait supposé que les mouvements vibratoires de l'éther avaient lieu, non pas dans la direction du mouvement de propagation, comme dans la transmission du son, mais parallèlement à la surface même des ondes. Dans ce qui précède, nous n'avons point rappelé ce principe, parce que les phénomènes étaient les mêmes, quelque direction qu'on ait supposée aux mouvements vibratoires. Mais l'explication de tous les phénomènes relatifs à la polarisation dépend de la direction des mouvements vibratoires de l'éther.

Des expériences décisives [1600] démontrent la réalité des mouvements transversaux ainsi que leur parallélisme dans la lumière polarisée, et les phénomènes des plaques cristallisées [1613] que ces mouvements sont perpendiculaires au plan de polarisation. Alors, si l'on admet que les corps lumineux éprouvent à chaque instant des perturbations qui changent continuellement la direction du plan de polarisation des rayons, de sorte que, dans un intervalle de temps très-court, ils émettent autant de rayons polarisés dans un certain plan que dans un plan perpendiculaire, cette lumière se comportera comme un faisceau de lumière formé de deux autres de même intensité, polarisés dans deux plans rectangulaires; et, par suite, elle ne pourra donner naissance à aucun des phénomènes que présente la lumière polarisée dans un seul plan, puisque les apparences sont toujours complémentaires quand les plans primitifs de polarisation sont rectangulaires. D'après cela, dans la polarisation de la lumière par la réflexion ou la réfraction simple ou double, l'action des corps consiste uniquement à ramener les mouvements de l'éther en totalité ou en partie dans un même plan.

1600. La direction du mouvement oscillatoire dans les ondes lumineuses peut être déterminée par l'expérience. En effet, cette direction est nécessairement parallèle ou perpendiculaire à la surface de l'onde; mais dans le premier cas, et dans ce cas seulement, si la polarisation consiste dans le parallélisme des petits mouvements, en faisant interférer deux faisceaux de lumière homogène polarisés dans deux plans rectangulaires, il ne se produira

pas de franges, quelle que soit d'ailleurs la différence des chemins parcourus : car le mouvement résultant sera toujours égal à la racine carrée de la somme des carrés des vitesses des ondes élémentaires, et l'intensité de la lumière en un point quelconque de l'espace éclairé par les deux faisceaux, sera égale à la somme des intensités de la lumière apportée par chacun des faisceaux. Voici maintenant les expériences de MM. Fresnel et Arago.

Considérons un faisceau de lumière introduit dans une chambre obscure à travers deux fentes parallèles : si dans chaque faisceau on place une pile égale de lames minces de mica, sous une assez grande inclinaison pour le polariser presque complétement, et de manière que les plans d'incidence soient perpendiculaires entre eux, les franges disparaissent ; elles se reproduisent quand les plans cessent d'être perpendiculaires, et avec un éclat qui croît à mesure que les plans approchent du parallélisme. Ainsi, les rayons de lumière polarisés suivant le même plan s'influencent comme les rayons de lumière non modifiée ; mais cette influence diminue à mesure que les plans de polarisation s'écartent l'un de l'autre, et devient nulle quand ils sont rectangulaires. L'expérience suivante conduit encore à la même conséquence.

« On prend une lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche parallèle à l'axe, et d'une épaisseur bien uniforme ; on la coupe en deux, et l'on place chacune des moitiés sur une des fentes de l'écran. Supposons qu'on ait tourné ces deux moitiés de manière que les bords qui étaient contigus dans la lame avant sa division soient restés parallèles, les axes le seront aussi : or, dans ce cas, on n'aperçoit qu'un seul groupe de franges au milieu de l'espace éclairé, comme avant l'interposition de la lame. Mais si l'on fait tourner une de ces deux moitiés dans son plan, en dérangeant ainsi le parallélisme, on fait naître deux autres groupes plus faibles, situés l'un à droite, l'autre à gauche du groupe du milieu, et qui en sont complétement séparés dans la lumière blanche lorsque les lames ont seulement un millimètre d'épaisseur. Il est à remarquer que le nombre de largeurs de frange comprises entre le milieu d'un de ces groupes et celui du groupe central est proportionnel à l'épaisseur des lames pour des cristaux de même nature, ou dont la double réfraction a la même énergie, comme le cristal de roche et la chaux sulfatée. A mesure que l'angle des deux axes augmente, ces nouveaux groupes de franges deviennent de plus en plus prononcés, et atteignent enfin leur maximum d'intensité quand les axes

des deux lames sont perpendiculaires entre eux : alors le groupe central, qui s'était affaibli graduellement, a tout à fait disparu, et est remplacé par une lumière uniforme. Il faut en conclure que les rayons qui les produisent par leur interférence ne sont plus capables de s'influencer mutuellement. Il est aisé de voir, d'après la position des franges, qu'elles résultent de l'interférence des rayons qui ont subi le même mode de réfraction dans les deux lames, puisque, les ayant parcourues avec des vitesses égales, ils doivent arriver simultanément dans le milieu de l'espace éclairé qui répond à des chemins égaux, si d'ailleurs les deux lames sont de même épaisseur et restent toujours l'une et l'autre perpendiculaires aux rayons, comme nous le supposons ici. Ainsi les franges du groupe central étaient formées par la superposition de celles qui résultaient 1° de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite; 2° de l'interférence des rayons extraordinaires de la première lame avec les rayons extraordinaires de la seconde. Les deux groupes excentriques, au contraire, résultent de l'interférence des rayons qui ont subi des réfractions différentes dans les deux lames; et, comme ce sont les rayons ordinaires qui marchent le plus vite dans le cristal de roche ou le sulfate de chaux, on voit que, si l'on emploie une de ces deux espèces de cristaux, le groupe de gauche doit être formé par la réunion des rayons extraordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite, et le groupe de droite par la réunion des rayons extraordinaires de la lame de droite avec les rayons ordinaires de la lame de gauche. Or, quand les axes des deux lames étaient parallèles, les rayons qui avaient éprouvé les mêmes réfractions dans les deux cristaux se trouvaient polarisés suivant la même direction, et ceux de noms contraires suivant des directions rectangulaires : voilà pourquoi le groupe de franges du milieu, qui provient de l'interférence des rayons de même nom, était à son maximum d'intensité, et les autres, qui résultent de l'interférence des rayons de noms contraires, ne paraissaient pas encore. Mais quand les axes des deux lames formaient entre eux un angle oblique, de 45° par exemple, les rayons de noms contraires et ceux de même nom pouvaient agir à la fois les uns sur les autres, puisque leurs plans de polarisation n'étaient plus rectangulaires, et les trois groupes de franges étaient produits. Lorsque enfin les axes deviennent perpendiculaires entre eux, les rayons de même nom se trouvent polarisés suivant les directions

rectangulaires, et le groupe central auquel ils donnaient naissance s'évanouit, tandis que les rayons ordinaires de la lame de gauche sont alors polarisés parallèlement aux rayons extraordinaires de la lame de droite; ce qui fait que le groupe de droite qu'ils produisent atteint son maximum d'intensité. Il en est de même du groupe de gauche, résultant de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de droite avec les rayons extraordinaires de la lame de gauche. » (FRESNEL.)

Nous rapporterons enfin une dernière expérience qui conduit aux mêmes conséquences. Si, après avoir fait polir un rhomboïde de chaux carbonatée sur deux faces opposées, dressées avec soin et bien parallèles, on le scie perpendiculairement à ces faces, on obtient deux rhomboïdes d'égale épaisseur, et dans lesquels la marche des rayons ordinaires et extraordinaires est exactement pareille sous la même incidence. En les plaçant l'un devant l'autre, de manière que les rayons partis du point lumineux, après avoir traversé le premier rhomboïde, parcourent ensuite le second, et que leurs faces soient perpendiculaires à la direction des rayons incidents, les sections principales étant à angle droit, les quatre faisceaux que produisent en général les deux rhomboïdes sont réduits à deux; le faisceau ordinaire du premier rhomboïde est réfracté extraordinairement dans le second, et le faisceau extraordinaire de celui-là est réfracté ordinairement dans celui-ci. Il résulte de cette disposition que les différences de marche provenant de la différence de vitesse des rayons ordinaires et extraordinaires se trouvent compensées pour les deux faisceaux sortants. Ils se croisent d'ailleurs sous un angle très-petit, et tel que les franges doivent avoir une largeur beaucoup plus que suffisante pour être aperçues; et cependant, quoique toutes les conditions nécessaires à la production des franges, pour les circonstances ordinaires, soient observées, il est impossible de parvenir à les faire paraître.

Il est donc complétement démontré que les rayons polarisés à angle droit n'exercent aucune influence l'un sur l'autre, et, par conséquent, que les mouvements de l'éther ont lieu dans le plan de l'onde, et dans une même direction quand la lumière est polarisée.

1601. Fresnel, en partant de certaines hypothèses très-probables, est parvenu à des formules qui représentent, avec une admirable précision, les intensités des rayons réfléchis ou réfractés, et d'où résultent, non-seulement les phénomènes généraux de polarisation qui se produisent par la réflexion et la réfraction ordinaires,

mais encore toutes les lois observées. Un faisceau de lumière naturelle pouvant être considéré comme composé de deux faisceaux d'égale intensité, polarisés dans deux directions rectangulaires disposés d'une manière quelconque, pour arriver à la détermination des phénomènes que présente la lumière naturelle quand elle se réfléchit à la surface des corps ou les traverse, il faut d'abord étudier les modifications que ces circonstances apportent à la lumière complétement polarisée.

1602. *Détermination de l'intensité des rayons réfléchis et réfractés lorsque le rayon incident est complétement polarisé dans le plan d'incidence.* Fresnel, pour résoudre cette question, admet : 1° que, dans la communication du mouvement de l'éther du premier milieu à celui du second, la force vive de l'onde incidente est égale à la somme des forces vives de l'onde réfléchie et de l'onde réfractée, c'est-à-dire que le produit de la masse de l'onde incidente, multiplié par le carré de la vitesse de vibration, est égal à la somme des produits des masses des ondes incidentes et réfractées, multipliées par les carrés des vitesses respectives; c'est un principe général de mécanique qui existe dans tout système de points matériels dont les vitesses ne varient en grandeur et en direction qu'en vertu de leurs liaisons mutuelles, et qui est applicable au choc des corps parfaitement élastiques ; 2° que les molécules de l'éther du premier et du second milieu qui sont voisines de la surface de séparation des deux milieux exécutent des oscillations de même amplitude, et que cette vitesse commune est égale à la somme des vitesses de l'éther dans l'onde incidente et dans l'onde réfléchie, ou à celle de l'onde transmise, mais toutes décomposées parallèlement à la surface. Ce dernier principe n'est point évident, et n'a point été démontré.

A l'aide de ces deux principes, il est facile de trouver l'intensité de l'onde réfléchie : en effet, si nous désignons par i et r les angles d'incidence et de réfraction, par 1 la vitesse de vibration dans le rayon incident, par v et u les vitesses correspondantes dans les rayons réfléchis et réfractés, nous aurons, en vertu du deuxième principe, dans le cas dont il s'agit, où les mouvements sont perpendiculaires au plan d'incidence

$$u = v + 1 \ldots. \quad (a)$$

Pour obtenir l'équation relative à la conservation des forces vives, il faut d'abord déterminer les masses des ondes incidentes réfléchies et réfractées : or, les largeurs des faisceaux incidents et réfractés sont représentées par les lignes GI et DM (fig. 921); et, comme on a $GI = GD \cos i$ et $DM = GD \cos r$, il s'ensuit que ces largeurs sont proportionnelles à $\cos i$, et $\cos r$. Les hauteurs des ondes incidentes et réfractées étant les longueurs d'ondulation dans le premier et le second milieu, et ces longueurs étant proportionnelles à $\sin i$ et à $\sin r$, il s'ensuit que les volumes d'éther de l'onde incidente et de l'onde réfractée, entre lesquels la communication du mouvement a lieu, sont proportionnels à $\cos i \sin i$ et à $\cos r \sin r$; et les masses seront proportionnelles à $d \cos i \sin i$ et à $d' \cos r \sin r$, d et d' étant les densités de l'éther dans le pre-

mier et le second milieu. Mais dans la communication du mouvement dans un fluide élastique, on a $v^2 = e : d$, e représentant l'élasticité du fluide et d sa densité ; si l'on suppose que dans les différents corps l'éther ne diffère que par la densité, et que son élasticité reste constante, la densité sera en raison inverse du carré de la vitesse de propagation du mouvement, ou proportionnelle à $1 : \sin^2 i$ et $1 : \sin^2 r$. Par conséquent, les masses d'éther des deux milieux seront proportionnelles à

$$\frac{\sin i \cos i}{\sin^2 i} \text{ et } \frac{\sin r \cos r}{\sin^2 r}, \text{ ou à } \frac{\cos i}{\sin i} \text{ et } \frac{\cos r}{\sin r}.$$

D'après cela, le principe de la conservation des forces vives donne

$$\frac{\cos i}{\sin i} = \frac{\cos r}{\sin r} u^2 + \frac{\cos i}{\sin i} v^2, \text{ ou } \frac{\cos i}{\sin i}(1 - v^2) = \frac{\cos r}{\sin r} u^2 \ldots. \ (b)$$

En éliminant successivement u et v entre les équations (a) et (b), on trouve

$$v = \frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)}, \text{ et } u = \frac{2 \sin r \cos i}{\sin(i + r)};$$

alors, en désignant par R l'intensité du rayon réfléchi, et par T celle du rayon transmis, comme ces intensités sont proportionnelles aux carrés des vitesses, on a

$$R = \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)} \ldots. \ (1), \text{ et } T = \frac{4 \cos^2 i \sin^2 r}{\sin^2(i + r)} \ldots. \ (2)$$

Si l'on remplace dans ces formules $\sin r$ par sa valeur tirée de la relation $\sin i = n \sin r$, on trouve

$$R = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \cos i}\right)^2, \text{ et } T = 1 - R.$$

Si dans cette dernière formule on fait $i = 0$, on trouve $R = (n - 1)^2 : (n + 1)^2$; et pour $i = 90$, on a $R = 1$. Il est facile, en outre, de reconnaître au moyen de la formule (1) que, si l'on fait croître i d'une manière continue de 0 à 90°, la valeur de R ira constamment en croissant : en effet, $\sin(i - r)$ est plus grand que $\sin i - \sin r = \sin r\,(n - 1)$, et d'autant plus que l'angle r est plus grand ; $\sin(i + r)$ est, au contraire, toujours plus petit que $\sin i + \sin r = \sin r\,(n + 1)$, et d'autant plus que r est plus grand. Donc, à mesure que i augmente, $\sin(i - r)$ prend des valeurs qui excèdent toujours davantage $\sin r\,(n - 1)$, et $\sin(i + r)$ prend des valeurs qui sont toujours, de plus en plus, plus petites que $\sin r\,(n + 1)$: ainsi la valeur de la fraction $\sin(i - r) : \sin(i + r)$ va constamment en croissant. Quant aux variations d'intensité du rayon réfracté, elles se déduisent de celles du rayon réfléchi, car les intensités de ces deux rayons sont complémentaires.

Les formules (1) et (2) peuvent aussi s'obtenir au moyen de celles du choc des corps élastiques. En effet, en désignant par m et m' deux masses, dont la première est animée d'une vitesse représentée par l'unité et la seconde en

repos, nous avons vu [147] que les vitesses des deux masses, après le choc, étaient

$$v = \frac{m - m'}{m + m'}, \quad \text{et } u = \frac{2m}{m + m'}.$$

En remplaçant dans ces deux formules m et m' par leurs valeurs $\cos i : \sin i$ et $\cos r : \sin r$, trouvées plus haut, on retombe sur les formules précédentes.

1603. *Détermination de l'intensité des rayons réfléchis et réfractés lorsque le rayon incident est complétement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence.* Dans ce cas, Fresnel admet les mêmes suppositions que dans le cas précédent; mais alors les molécules d'éther des deux milieux, voisines de la surface, ont pour vitesse, celles du premier milieu la somme des composantes parallèles à la surface des vitesses de l'éther dans le rayon incident et le rayon réfléchi, et celles du deuxième milieu la composante parallèle au même plan des vitesses de l'onde réfractée : alors on a les deux équations

$$\cos i\,(v + 1) = u \cos r,$$

$$\frac{\cos i}{\sin i} = \frac{\cos i}{\sin i} v^2 + \frac{\cos r}{\sin r} u^2, \text{ ou, } \frac{\cos i}{\sin i}(1 - v^2) = \frac{\cos r}{\sin r} u^2.$$

En éliminant successivement u et v entre ces deux équations, on trouve

$$v = \frac{\sin r \cos r - \sin i \cos i}{\sin r \cos r + \sin i \cos i} = -\frac{\tang (i - r)}{\tang (i + r)},$$

et

$$u = \frac{2 \sin r \cos i}{\sin r \cos r + \sin i \cos i}.$$

Ainsi, en désignant par R et par T les intensités des rayons réfléchis et réfractés, on a

$$R = \frac{\tang^2 (i - r)}{\tang^2 (i + r)} \ldots (3), \text{ et } T = \frac{4 \sin^2 r \cos^2 i}{(\sin r \cos r + \sin i \cos i)^2} \ldots (4)$$

Si l'on remplace dans ces formules $\sin r$ par sa valeur déduite de la relation $\sin i = n \sin r$, il vient

$$R = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - n^2 \cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + n^2 \cos i}\right)^2, \quad \text{et } T = 1 - R.$$

Si l'on suppose $i = 0$, il vient $R = (n - 1)^2 : (n + 1)^2$. Ainsi, lorsque le rayon incident est normal, l'intensité du rayon réfléchi est la même quand le rayon incident est polarisé parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence. Il est d'ailleurs facile de voir qu'il doit en être ainsi, car, la surface du corps étant parallèle aux ondes, la direction des mouvements vibratoires est sans influence. Lorsqu'on suppose $i = 90°$, on a $R = 1$, comme dans le cas où le rayon incident est complétement polarisé dans le plan d'incidence; mais ici l'intensité du rayon réfléchi n'augmente pas d'une manière continue de $i = 0$ à $i = 90°$, car, pour $i + r = 90$, l'équation (3) donne

$R = 0$: c'est ce qui devait être, car nous savons qu'alors la réflexion est nulle.

1604. *Détermination de l'intensité des rayons réfléchis lorsque le rayon incident est polarisé dans un plan quelconque.* A l'aide des formules (1), (2), (3), (4), on peut facilement trouver les intensités des rayons réfléchis ou réfractés dans toutes les circonstances possibles. Nous nous occuperons d'abord des rayons réfléchis.

Supposons d'abord que le rayon incident soit complétement polarisé, mais que son plan de polarisation fasse un angle A avec le plan d'incidence : ce faisceau pourra évidemment être considéré comme composé de deux faisceaux polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire, et ayant pour intensités $\cos^2 A$ et $\sin^2 A$. Alors l'intensité R du faisceau réfléchi sera donnée par la formule

$$R = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2 A + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2 A \ldots \quad (5)$$

Si la lumière était complétement polarisée dans le plan d'incidence, on aurait $A = 0$, et l'on retomberait sur la formule (1). Si le faisceau était, au contraire, polarisé dans un plan perpendiculaire, on aurait $A = 90°$, et l'on retrouverait la formule (3); et si, dans ce dernier cas, l'angle de réflexion était celui de la polarisation complète, on aurait $i + r = 90°$, d'où $\tang(i+r) = \infty$, et par suite $R = 0$.

Si la lumière incidente était complétement polarisée dans un plan incliné de 45° sur le plan d'incidence, on aurait $\cos^2 A = \sin^2 A = \frac{1}{2}$, et, par conséquent,

$$R = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right] \ldots \quad (6)$$

Ce dernier résultat est le même que celui qu'on obtiendrait en supposant la lumière incidente composée de deux faisceaux ayant chacun l'intensité 1/2, et polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire. On arriverait aussi exactement à la même formule en considérant le faisceau incident comme composé de deux faisceaux d'intensité 1/2, polarisés dans deux plans rectangulaires disposés d'une manière quelconque par rapport au plan de réflexion : car, en désignant par A et A′ les angles de ces plans avec le plan d'incidence, on aurait

$$R = \frac{1}{2}\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}(\cos^2 A + \cos^2 A') + \frac{1}{2}\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}(\sin^2 A + \sin^2 A') ;$$

mais, comme les angles A et A′ sont complémentaires, A et A′ disparaissent, et l'on retombe sur la formule (6).

Si la lumière incidente était naturelle, on pourrait toujours la considérer comme composée de deux faisceaux ayant chacun une intensité 1/2, et polarisés dans deux plans rectangulaires quelconques : par conséquent la formule (6) est applicable à la réflexion de la lumière naturelle.

Si l'on suppose la lumière naturelle, et qu'après avoir éliminé r dans l'équation (6) au moyen de la relation $n' \sin i = n \sin r$, n et n' étant les indices des deux milieux, on fasse successivement $i = 0$, $i + r = 90°$ et $i = 90$, on trouve pour les intensités des rayons réfléchis

$$\left(\frac{n' - n}{n + n'}\right)^2, \quad \frac{1}{2}\left(\frac{n'^2 - n^2}{n^2 + n'^2}\right) \quad \text{et} \quad 1.$$

Ainsi l'intensité du rayon réfléchi augmente avec l'inclinaison : par exemple, pour le verre ordinaire, dont l'indice est 3/2, en supposant que le milieu environnant soit de l'air, les quantités de lumière réfléchie sous ces trois incidences sont 0,04 ; 0,148 et 1.

On pourrait facilement, d'après ce qui précède, trouver la somme des intensités des rayons de lumière naturelle qui seraient réfléchis perpendiculairement par une plaque à faces parallèles après un nombre quelconque de réflexions : car, en désignant par r^2 l'intensité du rayon réfléchi à la première surface, les intensités des rayons émergents après 1, 3, 5, 7 réflexions, seront

$$r^2, \ (1 - r^2)^2 r^2, \ (1 - r^2)^2 r^6, \ (1 - r^2)^2 r^{10}, \ (1 - r^2)^2 r^{14};$$

et la somme de ces intensités sera

$$r^2 + (1 - r^2)^2 r^2 (1 + r^4 + r^8 + \ldots) = \frac{(n - n')^2}{n^2 + n'^2}.$$

En appliquant cette formule au verre ordinaire, au cristal de roche, au sel gemme, à l'eau et au diamant, pour lesquels les indices sont 3/2, 25/16, 17/11, 53/40, 100/41, en supposant que le premier milieu soit de l'air, on trouve les résultats suivants :

	Réflexion à la première surface.	Réflexion totale d'une plaque à faces parallèles.
Verre commun.....	0,040.....	0,077
Cristal de roche.....	0,048.....	0,091
Eau.....	0,0195.....	0,038
Diamant.....	0,175.....	0,297
Sel gemme.....	0,045.....	0,087

On voit à l'inspection de ces nombres la cause de l'éclat du diamant. Les nombres de la dernière colonne qui sont relatifs au verre commun, au cristal de roche et au sel gemme sont très-voisins de ceux que M. Melloni a trouvés pour la quantité de chaleur réfléchie. Ces derniers nombres sont, comme nous l'avons dit, 0,084, 0,081 et 0,08. Ce rapprochement semblerait indiquer que les indices de réfraction des rayons caloriques sont les mêmes que ceux de la lumière ou du moins en diffèrent peu.

Enfin, si la lumière incidente se composait de lumière naturelle et de lumière polarisée, en désignant par k l'intensité du faisceau polarisé, l'intensité du faisceau naturel sera $1 - k$, et ce dernier pouvant être considéré comme

composé de deux faisceaux ayant chacun pour intensité $\frac{1-k}{2}$, et polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire, on aura

$$T = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\left(k\cos^2 A + \frac{1-k}{2}\right) + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\left(k\sin^2 A + \frac{1-k}{2}\right) \ldots \quad (7)$$

1605. *Mouvement du plan de polarisation produit par la réflexion.* Lorsqu'un rayon de lumière polarisée se réfléchit sur une surface polie, le plan de polarisation du rayon réfléchi n'a pas, en général, la même position que celui du rayon incident; mais il est facile de la déterminer. Il est d'abord évident que, si la lumière incidente était polarisée dans le plan d'incidence ou dans un plan perpendiculaire, le rayon réfléchi serait polarisé dans la même direction : car, dans l'un et l'autre cas, le plan de réflexion étant symétriquement placé relativement aux mouvements vibratoires, il n'y a pas de raison pour que la direction de ces mouvements change plutôt dans un sens que dans l'autre. Supposons maintenant que le plan de polarisation du rayon incident fasse un angle A avec le plan d'incidence, on pourra considérer le rayon incident comme composé de deux rayons polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire, ayant le premier une vitesse de vibration représentée par $\cos A$ et l'autre par $\sin A$; le premier donnera un rayon réfléchi dans lequel la vitesse de vibration sera $\cos A \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)}$, et le second un autre rayon réfléchi ayant une vitesse de vibration représentée par $\sin A \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)}$. Mais, si l'on désigne par A' l'angle du plan de polarisation du rayon réfléchi avec le plan de réflexion, la direction de ce plan sera celle de la résultante des mouvements dans les deux faisceaux élémentaires réfléchis, polarisés dans le plan de réflexion et dans un plan perpendiculaire : on aura donc

$$\tang A' = \frac{\sin A}{\cos A} \times \frac{\tang(i-r)}{\tang(i+r)} \times \frac{\sin(i+r)}{\sin(i-r)}, \text{ ou } \tang A' = \tang A \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)} \ldots \quad (8)$$

Il résulte de cette formule que la direction du plan de polarisation du rayon réfléchi ne coïncide avec celui du rayon incident qu'autant que A est égal à 0° ou à 90°, ou bien que, A étant quelconque, on a $\cos(i+r) = \cos(i-r)$, ce qui exige que $i = 0$, ou $i = 90°$.

On voit aussi, à l'inspection de cette formule, que A' est toujours plus petit que A, car les angles i et r étant toujours $<$ que 90°, $\cos(i+r)$ est $<$ que $\cos(i-r)$: ainsi la réflexion rapproche toujours le plan de polarisation du plan d'incidence. Lorsque la réflexion a lieu sous un angle tel que $i+r = 90°$, $A' = 0$: ainsi, sous l'angle de la polarisation complète, le rayon réfléchi est polarisé dans le plan d'incidence, quelle que soit la direction du plan de polarisation du rayon incident.

Si le rayon incident était formé de lumière naturelle, on pourrait le considérer comme composé de deux faisceaux égaux, polarisés dans deux plans rectangulaires : alors le rayon réfléchi serait composé de deux faisceaux polarisés

dans deux plans qui seront plus rapprochés du plan d'incidence, et qui coïncideraient avec lui si la réflexion avait lieu sous un angle tel que $i + r = 90°$. Si l'on considère chacun des plans primitifs de polarisation comme étant incliné de 45° sur le plan d'incidence, la formule (8) devient

$$\tang A' = \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)}.$$

En discutant cette formule, il est facile de voir que, sous l'incidence perpendiculaire, les plans de polarisation des deux faisceaux réfléchis sont inclinés de 45° sur le plan de réflexion et, par conséquent, sont perpendiculaires entre eux : ainsi le rayon réfléchi est à l'état naturel comme le rayon incident; mais, à mesure que l'angle d'incidence augmente, les deux plans de polarisation se rapprochent du plan d'incidence, et coïncident avec lui lorsque $i + r = 90°$. Au delà de cette incidence les plans de polarisation s'éloignent du plan d'incidence, mais en tournant dans le même sens, car $\cos(i+r)$ change de signe; enfin, pour l'incidence de 90°, les plans de polarisation redeviennent de nouveau rectangulaires, et le rayon réfléchi reprend les propriétés de la lumière naturelle.

1606. *Détermination de la quantité de lumière polarisée dans le plan d'incidence qui se trouve dans le rayon réfléchi.* Considérons un faisceau de lumière entièrement polarisé dans l'azimut A, on a

$$R = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2 A + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2 A....$$

et

$$\tang A' = \tang A \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)}....$$

Or, la quantité de lumière polarisée est égale à la différence des quantités de lumière polarisée dans le plan d'incidence et dans un plan perpendiculaire : par conséquent, en désignant cette quantité par K, on aura

$$K = R(\cos^2 A' - \sin^2 A') = R(1 - 2\sin^2 A')....$$

En combinant les trois dernières équations, on trouve pour la quantité de lumière polarisée la valeur suivante :

$$K = \left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2 A + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2 A\right]$$
$$\left[\frac{\cos^2(i-r) - \tang^2 A\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r) + \tang^2 A\cos^2(i+r)}\right].... \quad (9)$$

Si la lumière incidente était naturelle, il faudrait la considérer comme étant composée de deux faisceaux ayant une intensité 1/2, et polarisés dans des plans inclinés à 45° sur le plan d'incidence : alors on aurait

$$\cos^2 A = \sin^2 A = \frac{1}{2},$$

et la formule précédente deviendrait

$$K = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right]$$
$$\left[\frac{\cos^2(i-r) - \cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r) + \cos^2(i+r)}\right] \ldots\ldots (10)$$

M. Arago a vérifié l'exactitude de cette dernière formule, en déterminant par des expériences nombreuses les incidences sous lesquelles le rayon réfléchi renfermait la même quantité de lumière polarisée, et les résultats des expériences faites sur différentes espèces de verre et sur l'eau s'accordent très-bien avec la formule.

Si le rayon incident, toujours formé de lumière naturelle, était perpendiculaire à la surface réfléchissante, il faudrait faire $i = 0$ dans la dernière formule, qui deviendrait alors $K = 0$. On obtient le même résultat en supposant $i = 90$. Ces deux cas particuliers de la formule ont aussi été vérifiés par l'expérience.

Enfin, si l'on pose $i + r = 90$, la formule devient

$$K = \frac{1}{2}\sin^2(i-r),$$

résultat identiquement le même que celui que donne la formule (6) qui représente l'intensité totale de la lumière réfléchie; la loi de Brewster est alors une conséquence de la théorie.

Si la lumière incidente est complétement polarisée dans le plan d'incidence, on a $A = 0$, et la formule devient

$$K = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}.$$

La valeur de K étant la même que celle que l'on obtient dans les mêmes circonstances pour l'intensité totale du rayon réflechi, il s'ensuit que le rayon réfléchi est complétement polarisé dans le plan primitif.

Si le rayon incident était polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence, on aurait $A = 90^\circ$,

et
$$K = -\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}.$$

Le signe — indique que la lumière est polarisée dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence; et, comme cette valeur de K est la même que celle qu'on obtient dans le même cas pour l'intensité totale du rayon réfléchi, il s'ensuit que le rayon réfléchi est complétement polarisé dans le plan primitif. Si $i + r = 90^\circ$, la valeur de K devient nulle, comme on devait s'y attendre.

Si le rayon incident était seulement en partie polarisé, il serait également très-facile de trouver l'intensité du rayon et la direction du nouveau plan de polarisation, en considérant la lumière comme composée de deux faisceaux, l'un de lumière naturelle, l'autre de lumière complétement polarisée.

1607. *Polarisation par des réflexions successives.* Lorsqu'un rayon de lumière naturelle se réfléchit sous une incidence différente de celle qui produit

la polarisation complète, nous savons qu'il se polarise en partie; ou, en considérant la lumière naturelle comme formée de deux faisceaux d'égale intensité, polarisés dans des plans inclinés de 45° sur le plan de réflexion, que ces plans se rapprochent du plan d'incidence par le seul fait de la réflexion : on conçoit alors que, si le rayon éprouve une suite de réflexions, les plans de polarisation, se rapprochant toujours davantage du plan d'incidence, finiront, après un nombre suffisant de réflexions, par coïncider avec lui, et alors la lumière se trouvera complétement polarisée.

La formule (8) permet de calculer la position des plans de polarisation après un nombre quelconque de réflexions. Si nous supposons que la réflexion ait lieu entre deux surfaces parallèles, de manière que les angles de réflexion soient les mêmes, en désignant par A', A'', A'''.... les azimuts des plans de polarisation après 1, 2, 3.... réflexions, nous aurons évidemment

$$\tang A' = \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)},$$

$$\tang A'' = \tang A' \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)} = \frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)},$$

$$\tang A''' = \tang A'' \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)} = \frac{\cos^3(i+r)}{\cos^3(i-r)},$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$\tang A^{(n)} = \tang A^{(n-1)} \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)} = \frac{\cos^n(i+r)}{\cos^n(i-r)}.$$

Cos $(i+r)$ étant toujours plus petit que cos $(i-r)$, on voit que l'azimut du plan de polarisation va en diminuant à mesure que le nombre des réflexions augmente; mais, comme cet angle ne peut jamais devenir nul, la polarisation ne peut jamais devenir complète quand $i+r$ diffère de 90°. Cependant, l'azimut des plans de polarisation devenant très-petit après un nombre de réflexions qui n'est jamais très-considérable, la polarisation devient alors presque totale. M. Brewster a vérifié ces résultats théoriques par une expérience sur le verre; il a reconnu qu'après cinq réflexions sous un angle de 70°, la polarisation était complète : or, la formule donne alors 22' pour l'azimut des plans de polarisation.

On pourrait facilement trouver la position des plans de polarisation dans le cas où les angles d'incidence seraient variables, et où les substances réfléchissantes seraient différentes.

Toutes les questions que nous venons de traiter pour le rayon réfléchi peuvent se résoudre de la même manière pour le rayon réfracté.

1608. *Intensité du rayon réfracté.* La formule générale qui représente l'intensité du rayon transmis peut se déduire des formules qui représentent cette intensité dans le cas où le rayon incident est polarisé dans le plan d'incidence ou dans un plan perpendiculaire; mais il est plus simple de prendre le complément du rayon réfléchi : on aura ainsi

$$T = 1 - \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2 A - \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2 A,$$

et, dans le cas de la lumière naturelle,

$$T = 1 - \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right].$$

Sous l'incidence perpendiculaire et sous l'angle de polarisation, on trouve

$$T = 1 - \frac{(n'-n)^2}{(n'+n)^2}, \quad \text{et} \quad T = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{n'^2-n^2}{n^2+n'^2}\right).$$

1609. *Quantité de lumière polarisée qui se trouve dans le rayon réfracté.* On pourrait déterminer cette quantité par la même méthode que nous avons employée pour la réflexion; mais il est beaucoup plus simple de la déduire de celle qui se trouve polarisée par réflexion dans le plan d'incidence et dans le plan perpendiculaire : car les quantités de lumière polarisée dans chacun de ces plans qui se trouvent dans le rayon réfléchi et dans le rayon réfracté, sont complémentaires. Ainsi, en désignant par A l'azimut du plan de polarisation du rayon incident, on aura pour la quantité de lumière polarisée dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence,

$$K = \sin^2 A\left[1 - \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right] - \cos^2 A\left[1 - \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\right],$$

et, dans le cas où la lumière incidente est naturelle,

$$K = \frac{1}{2}\,\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} - \frac{1}{2}\,\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}.$$

Cette dernière valeur de K est la même que celle qu'on trouverait directement pour la quantité de lumière du rayon réfléchi polarisée dans le plan d'incidence, et elle est équivalente à celle que nous avons donnée en parlant de l'angle du plan de polarisation du rayon réfléchi. Ainsi, pour la lumière naturelle, il y a autant de lumière polarisée dans le rayon réfracté que dans le rayon transmis. C'est la loi qui avait été découverte par M. Arago longtemps avant que la théorie l'eût indiquée.

1610. *Mouvement du plan de polarisation produit par la réfraction.* Le rayon incident, étant polarisé dans un plan formant avec le plan d'incidence un angle A, pourra être considéré comme composé de deux rayons polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire, et dont les vitesses de vibration seraient cos A et sin A; chacun de ces rayons donnera des rayons transmis dont les vitesses de vibration seront

$$\cos A \times \frac{2\sin r\cos i}{\sin(i+r)}, \quad \text{et} \quad \sin A \times \frac{2\sin r\cos i}{\sin(i+r)\cos(i-r)};$$

en remarquant que

$$\sin i\cos i + \sin r\cos r = \sin(i+r)\cos(i-r);$$

d'où l'on déduit facilement que l'angle A' de la résultante avec le plan d'inci-

dence, c'est-à-dire l'azimut du plan de polarisation du rayon transmis, est donné par l'équation

$$\cot A' = \cot A \cos (i - r).$$

Si la lumière était naturelle, pour chacun de ces plans de polarisation, il faudrait poser $A = 45°$, d'où $\cot A = 1$, et la formule deviendrait

$$\cot A' = \cos (i - r).$$

En supposant que le rayon incident soit d'abord perpendiculaire à la surface du corps, et qu'il s'incline toujours davantage, $i - r$ ira en augmentant, $\cos(i - r)$ en diminuant, et A' en augmentant. La formule générale et la formule relative au cas particulier de la lumière non polarisée ont été données d'abord par M. Brewster comme résultats de l'expérience; il se servait d'un prisme disposé de manière que le rayon transmis rencontrait perpendiculairement la seconde surface : alors le rayon émergent avait le même plan de polarisation que le rayon réfracté.

Si le rayon sortait dans l'air par une surface parallèle à la première, en désignant par A'' l'azimut du plan de polarisation du rayon émergent, et observant que

$$\cos (i - r) = \cos (r - i),$$

il viendrait $\cot A'' = \cot A' \cos (i - r) = \cot A \cos^2 (i - r)$;

et, pour les deux plans de polarisation de la lumière naturelle,

$$\cot A'' = \cos^2 (i - r),$$

M. Brewster a vérifié ces deux formules par un grand nombre d'observations.

Si un faisceau de lumière naturelle traversait successivement une série de plaques parallèles, l'azimut des plans de polarisation du dernier rayon émergent serait donné par la formule

$$\cot A^{(n)} = \cos^n (i - r).$$

$i - r$ étant une quantité $<$ que $90°$, $A^{(n)}$ s'approche toujours davantage de l'angle droit à mesure que n augmente, mais sans jamais lui être égal. Mais quand la différence est très-petite, les deux plans partiels de polarisation coïncident sensiblement, et la lumière réfractée paraît complétement polarisée dans un plan perpendiculaire au plan de réfraction. Par exemple, M. Brewster a trouvé que la lumière était complétement polarisée par des piles de 8, 24 et 47 plaques de verre, sous des incidences de 78° 52′ pour la première, de 61° pour la seconde et de 43° 34′ pour la troisième; la formule donne pour les azimuts des plans de polarisation des rayons émergents 88° 50′, 89° 38′ et 88° 27′.

1611. Pour résumer tout ce que nous venons de dire sur la polarisation par réflexion et par réfraction, conservons les notations précédentes, désignons par r et r' les quantités de lumière du rayon réfléchi polarisées dans le

plan d'incidence et dans un plan perpendiculaire, par t et t' les quantités analogues pour le rayon réfracté, et posons

$$a = \sin(i-r) : \sin(i+r) \quad \text{et} \quad b = \tang(i-r) : \tang(i+r),$$

nous aurons

$$r = a^2 \cos^2 A, \quad r' = b^2 \sin^2 A, \quad R = r + r', \quad K = r - r',$$

$$\tang A' = \sqrt{\frac{r'}{r}} = \tang A \cos(i+r) : \cos(i-r);$$

$$t = (1-a^2)^2 \cos^2 A, \quad t' = (1-b^2)^2 \sin^2 A, \quad T = t + t', \quad K = t' - t,$$

et $$\tang A_1 = \sqrt{\frac{t'}{t}} = \tang A : \cos(i-r).$$

1612. *Polarisation des anneaux colorés formés par les lames minces.* M. Arago a reconnu dans la lumière des anneaux colorés plusieurs phénomènes, dont un surtout est fort remarquable, et qui s'expliquent avec une grande facilité dans le système des ondulations. Voici en quoi ils consistent : lorsqu'on observe les anneaux réfléchis à travers un prisme biréfringent achromatique, placé de manière que sa section principale soit parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion, sous l'incidence perpendiculaire, on aperçoit deux images de même intensité : par conséquent, la lumière des anneaux n'est pas polarisée; mais, si l'inclinaison augmente, une des deux images s'affaiblit, disparaît sous l'angle de polarisation complète du verre, et reparaît au delà avec une intensité croissante à mesure que les rayons réfléchis s'inclinent davantage. L'image qui éprouve ces variations est l'image extraordinaire quand la section principale du prisme est parallèle au plan de réflexion ; c'est l'image ordinaire dans le cas contraire. Dans toutes les inclinaisons du rayon incident, les teintes des deux images sont les mêmes; elles ne diffèrent que par l'intensité. Ainsi la lumière des anneaux colorés est en partie polarisée dans le plan d'incidence, et la quantité de lumière polarisée augmente jusqu'à ce que l'angle de réflexion soit celui de la polarisation complète sur le verre, et diminue au delà.

Les mêmes phénomènes se développent lorsque les anneaux se forment entre une lentille et un miroir métallique, mais avec cette différence caractéristique, que l'image qui reparaît au delà de l'incidence de 35°, présente des teintes complémentaires de celle qui n'a pas disparu.

Lorsqu'on observe avec un prisme biréfrigent les anneaux transmis à travers un système de deux lentilles éclairées par une large feuille de papier, en arrêtant par un écran les rayons qui pourraient produire des anneaux par réflexion, on aperçoit deux images qui éprouvent, par les changements d'inclinaison, les mêmes variations que les anneaux réfléchis : par conséquent, la lumière est polarisée de la même manière. Le prisme biréfringent n'agit que sur la lumière même des anneaux, car un objet placé sur le papier donne toujours deux images de même intensité.

Si l'on observe directement les anneaux réfléchis formés entre un verre et un prisme biréfringent, le verre étant placé en dessus, les anneaux ne diffèrent

en rien de ceux qui se forment entre deux lames de verre ; mais, si la plaque cristallisée est placée en dessus, on voit deux systèmes d'anneaux ; et, si l'angle d'incidence est de 35°, en faisant tourner le système des deux plaques, pour chaque tour complet, l'image disparaît deux fois. Lorsqu'avec le même appareil on observe les anneaux transmis, les images ne changent pas d'intensité quand la lumière traverse d'abord la plaque de verre ; dans le cas contraire, les anneaux varient d'intensité comme les anneaux réfléchis.

De tous ces faits, deux seulement exigent une explication particulière : ce sont 1° le parallélisme des plans de polarisation des anneaux réfléchis et transmis, et la tendance vers une polarisation opposée sous une incidence qui excède celle de la polarisation complète ; 2° le changement qu'éprouve un des deux systèmes d'anneaux à travers un prisme biréfringent, au delà de l'angle de la polarisation complète, lorsque la plaque inférieure est métallique.

Pour rendre compte du premier, il faut considérer la lumière incidente comme composée de deux faisceaux d'égale intensité, polarisés, l'un dans le plan de réflexion, l'autre dans un plan perpendiculaire, et calculer les intensités des rayons réfléchis à la seconde surface de la lame mince, et de ceux qui sortent après deux réflexions intérieures, en tenant compte des quantités de lumière perdue à toutes les réflexions et les réfractions qu'ils ont éprouvées. Ces intensités étant précisément celles des anneaux polarisés dans le plan de réflexion et dans un plan perpendiculaire, celui qui aura la plus grande intensité déterminera le sens de la polarisation des deux systèmes superposés. En désignant par r^2 et r'^2 les intensités des rayons réfléchis, pour les rayons incidents polarisés dans le plan d'incidence et dans un plan perpendiculaire, et dont l'intensité est 1, on trouve que les rayons réfléchis à la seconde surface de la lame mince ont pour intensités $r^2(1-r^2)^4$ et $r'^2(1-r'^2)^4$, et que celles des rayons qui sortent après deux réflexions sont $r^4(1-r^2)^4$, et $r'^4(1-r'^2)^4$. Si l'on remplace r^2 et r'^2 par leurs valeurs $\sin^2(i-r) : \sin^2(i+r)$ et $\tang^2(i-r) : \tang^2(i+r)$, on trouve que les rayons polarisés dans le plan d'incidence ont une plus grande intensité que les autres.

Quant au fait observé lorsque la plaque inférieure est métallique, il se réduit évidemment à ceci : lorsque la lumière incidente est polarisée perpendiculairement au plan d'incidence, au delà de l'incidence correspondant à $i+r=90°$, un des deux systèmes de rayons réfléchis qui interfèrent éprouve un retard d'une demi-longueur d'ondulation. Ce retard s'explique par la seule inspection de la formule qui représente la vitesse d'oscillation dans le rayon réfléchi. En effet ces vitesses pour le rayon réfléchi à la première et à la seconde surface de la lame mince sont proportionnelles à

$$\frac{\tang(i-r)}{\tang(i+r)} \quad \text{et} \quad \frac{\tang(i-r')}{\tang(i+r')},$$

r et r' étant les angles de réfraction correspondants à l'angle d'incidence i dans la lame mince et dans le dernier milieu. Or, quand $i+r$ dépasse 90°, $\tang(i+r)$ change de signe, et comme il n'en est pas de même de $\tang(i+r')$, attendu que, le second milieu étant métallique, r' est beaucoup plus petit que r, et ce changement de signe correspond, comme on sait, à une différence de chemin d'une demi-longueur d'ondulation. Cette explication,

due à M. Ivory, a été vérifiée directement. Il résulte évidemment de ce que nous venons de dire que, si on formait des anneaux avec une lame d'air renfermée entre deux lames minces, dont la première aurait un indice plus petit que la seconde, pour les incidences comprises entre $i + r = 90$, et $i + r' = 90$, on devrait obtenir des anneaux à centre blanc lorsque la lumière incidente est polarisée dans un plan perpendiculaire au plan de réflexion; et quand la lumière est naturelle, deux systèmes d'anneaux, l'un à centre noir, l'autre à centre blanc, superposés, et que l'on pourrait facilement séparer en les observant avec un prisme de chaux carbonatée. L'expérience a complétement confirmé ces conséquences de la théorie.

Le tableau suivant, calculé par M. Brewster, renferme les quantités de lumière réfléchie réfractées et polarisées, pour le verre dont l'indice de réfraction est 1,525; la quantité de lumière incidente naturelle est 1000, et les angles sont comptés à partir de la normale.

ANGLES d'incidence.	ANGLES de réfraction.	AZIMUT DU PLAN DE POLARISATION.		QUANTITÉ DE LUMIÈRE		
		LUMIÈRE réfléchie.	LUMIÈRE refractée.	réfléchie.	transmise.	polarisée.
0° 0′	0° 00′	45° 00′	45° 00′	43,23	956,77	0,00
2 0	1 18,7	44 37	45 00,7	43,26	956,74	0,07
10 0	6 32	43 51	45 03	43,39	956,61	1,73
20 0	12 58	40 13	45 13	43,41	956,59	7,22
25 0	16 05	37 21	45 21	43,64	956,36	11,06
30 0	19 08,5	33 40	45 31	44,78	954,22	17,24
35 0	22 06	29 08	45 44	46,33	953,67	24,40
40 0	24 56	23 41	46 00	49,10	950,90	32,20
45 0	27 37,5	17 22	46 20	53,66	946,33	44,00
50 0	30 09	10 18	46 45	61,36	938,64	57,40
56 45	33 15	0 00	47 29	79,50	920,50	79,50
60 0	34 36	5 04	47 54	93,31	906,69	91,60
65 0	36 28	12 45	48 42	124,86	875,14	112,70
70 0	38 02	18 32	49 28	162,67	837,33	129,80
75 0	39 18	26 52	50 55	257,56	742,44	152,30
78 0	39 54	30 44	51 48	329,95	670,05	157,60
78 7	39 55	30 53	51 50	333,20	666,80	157,65
79 0	40 04	31 59	52 07	359,27	640,73	157,60
80 4	40 19	33 13	52 27	391,70	608,30	156,70
82 4	40 35	36 22	53 26	499,44	500,56	145,40
84 0	40 42	38 02	53 57	560,32	439,68	134,93
85 8	40 47	39 12	54 22	616,28	383,72	127,70
85 50,7	40 50,7	40 12	54 44	666,44	333,56	111,11
86 0	40 51	40 22	54 48	676,26	323,74	108,67
87 0	40 54	41 32	55 16	744,11	255,89	89,80
88 0	40 57	42 23	55 43	819,90	180,10	65,90
89 0	40 58	43 51	56 14	904,81	95,19	36,30
90 0	40 58	45 00	56 29	1000,00	0,00	0,00

Double réfraction.

1613. La théorie de la double réfraction est entièrement due au génie de Fresnel; elle est certainement une des plus remarquables que possède la science, et, par sa généralité qui embrasse tous les phénomènes qui étaient connus lorsqu'elle a été créée et ceux qui ont été découverts depuis, et par les nouvelles propriétés de l'éther qu'elle a fait connaître. Les limites dans lesquelles nous sommes obligé de nous renfermer ne nous permettent pas d'entrer dans tous les détails qui seraient nécessaires pour l'intelligence complète de cette belle théorie; nous essayerons seulement de donner une idée nette des principes sur lesquels elle repose, et des résultats auxquels elle conduit.

1614. Dans le système des ondulations, la vitesse de propagation des ondes dépend nécessairement de l'élasticité de l'éther dans le milieu que traverse la lumière; or, la vitesse de propagation n'étant pas la même dans les cristaux suivant toutes les directions, on a été conduit à admettre que dans ces corps l'élasticité de l'éther n'est pas la même dans tous les sens.

1615. Considérons un cristal à un axe comme un milieu élastique dans lequel la force accélératrice qui résulte du déplacement d'une file de molécules perpendiculaires à l'axe, relativement aux rangées contiguës, est la même tout autour de l'axe, tandis que les déplacements parallèles à l'axe produisent des forces accélératrices d'une intensité différente, plus forte si le cristal est répulsif, et plus faible s'il est attractif. Le caractère distinctif des rayons qui éprouvent la réfraction ordinaire étant de se propager avec la même vitesse suivant toutes les directions, il faudra admettre que les mouvements oscillatoires s'exécutent perpendiculairement au plan mené par ces rayons et l'axe du cristal : car alors les déplacements qu'ils occasionnent, s'effectuant toujours suivant des directions perpendiculaires à l'axe, développeront toujours la même force accélératrice. Mais, d'après le sens qu'on attache à l'expression *plan de polarisation*, le plan dont nous venons de parler est précisément le plan de polarisation des rayons ordinaires. Ainsi, dans un faisceau polarisé, le mouvement oscillatoire s'exécute perpendiculairement à ce qu'on appelle plan de polarisation.

Les oscillations des rayons ordinaires étant perpendiculaires au plan mené par l'axe, celles des rayons extraordinaires seront pa-

rallèles à ce plan, et, bien entendu, toujours perpendiculaires aux rayons. On voit alors qu'à mesure qu'ils changeront d'inclinaison relativement à l'axe, la direction du mouvement oscillatoire en changera aussi : il sera parallèle à l'axe quand les rayons lui seront perpendiculaires, et perpendiculaire à l'axe quand les rayons lui seront parallèles; ainsi, dans ce dernier cas, la vitesse de propagation des rayons extraordinaires sera la même que celle des rayons ordinaires. Mais pour toutes les autres directions, les petits dérangements des files de molécules ne s'exécutant plus perpendiculairement à l'axe, les forces accélératrices qui en résultent, et par suite la vitesse de propagation, ne peuvent plus être les mêmes. Cette différence augmente progressivement jusqu'à ce que le mouvement oscillatoire soit parallèle à l'axe; c'est alors qu'elle atteint son maximum.

Considérons ce cas particulier pour simplifier les idées, et supposons qu'on expose perpendiculairement au rayon incident une plaque cristallisée parallèle à l'axe, en sorte que les rayons qui la traversent soient perpendiculaires à ce dernier; supposons, en outre, que le faisceau incident soit polarisé suivant un plan déterminé, faisant un angle i avec la section principale du cristal : ses oscillations seront perpendiculaires à ce plan. Cela posé, on peut, en raison du principe de la composition et de la décomposition des petits mouvements, concevoir chacune des vitesses d'oscillation des ondes incidentes décomposée en deux autres, l'une perpendiculaire et l'autre parallèle à la section principale : les premières composantes produiront les ondes ordinaires, et les autres celles qui éprouvent la réfraction extraordinaire. Or, si l'on prend pour unité le facteur commun qui multiplie toutes les vitesses d'oscillation des diverses couches de l'onde qui entre dans le cristal, $\cos i$ sera le facteur commun des premières composantes ou leur intensité de vitesse absolue, et $\sin i$ celle des autres composantes, et les intensités des rayons ordinaires et extraordinaires seront entre elles comme $\cos^2 i$ est à $\sin^2 i$: explication bien simple de la loi de Malus. Les oscillations de ces deux systèmes d'ondes, étant rectangulaires, s'exécuteront dans le cristal d'une manière indépendante; et, en raison de la différence d'énergie des forces accélératrices qui résultent des petits déplacements des molécules du milieu, parallèlement ou perpendiculairement à l'axe, les deux systèmes d'ondes se propageront avec des vitesses différentes, et la distance entre leurs points correspondants deviendra

d'autant plus considérable qu'ils auront traversé une plus grande épaisseur du cristal.

Si c'est de la lumière naturelle qu'on fait tomber sur le cristal, on pourra appliquer aux divers systèmes d'ondes polarisées dont elle se compose ce que nous venons de dire pour un seul : chacun se divisera de la même manière en ondes ordinaires et ondes extraordinaires, dont les intensités seront en général différentes. Mais comme, en raison de la multitude des chances, il doit se trouver en somme autant de lumière polarisée suivant un plan quelconque que suivant le plan perpendiculaire, les rayons ordinaires et extraordinaires auront la même intensité. Ces considérations expliquent les phénomènes, en supposant la décomposition de la lumière en deux faisceaux polarisés à angle droit; mais on ne voit pas pourquoi cette décomposition a lieu. L'explication des phénomènes que présentent les cristaux à deux axes a conduit Fresnel à des considérations beaucoup plus générales qui font voir la cause de la décomposition des mouvements, et qui conduisent à la détermination de la surface des ondes dans tous les cas qui peuvent se présenter.

1616. Quand on déplace une molécule dans un milieu élastique, la résultante des forces qui tendent à la ramener à sa première position n'est pas généralement parallèle à la direction suivant laquelle elle a été déplacée. Il faut, pour cela, que les résultantes des forces qui poussent cette molécule de droite et de gauche dans chaque azimut aient la même intensité. Cette circonstance n'a généralement lieu que dans trois directions rectangulaires, qui portent le nom d'axes d'élasticité. Si nous supposons que les axes d'élasticité conservent la même direction dans toute l'étendue du milieu, ce qui aura lieu toutes les fois que les molécules seront disposées entre elles de la même manière, comme dans les corps cristallisés, en prenant sur chacun des trois axes, et dans toutes les directions possibles, des longueurs proportionnelles aux racines carrées des élasticités dans ces directions, on formera une surface connue sous le nom de *surface d'élasticité*, dont les rayons vecteurs représenteront les vitesses de propagation des mouvements parallèles à leurs directions.

Fresnel a démontré que la surface d'élasticité était représentée en coordonnées polaires par l'équation

$$V^2 = a^2 \cos^2 X + b^2 \cos^2 Y + c^2 \cos^2 Z,$$

a^2, b^2, c^2 étant les élasticités mises en jeu par les vibrations

parallèles aux axes des x, des y et des z, de manière que les vitesses de propagation correspondantes, qui sont proportionnelles aux racines carrées des élasticités, se trouvent représentées par a, b, c. Dans cette équation, V ne représente pas la valeur totale de la réaction, mais seulement sa composante dans la direction du rayon vecteur; de sorte que la résultante totale se compose de V et d'une autre force perpendiculaire au rayon vecteur, variable de grandeur et de position.

1617. Appliquons ces idées à la lumière. Admettons qu'elle se transmette à travers un corps par les vibrations de l'éther intermoléculaire, et que, dans un même corps cristallisé, l'élasticité de l'éther ne soit pas la même dans toutes les directions. Désignons par les lignes rectangulaires OX, OY, OZ (fig. 928), les trois axes d'élasticité; a, b, c seront les vitesses avec lesquelles les petits mouvements parallèles à OX, OY et OZ se propageraient perpendiculairement aux directions de ces axes; et supposons que a soit plus grand que b, et que b soit plus grand que c, de sorte que b soit l'axe moyen d'élasticité. Considérons une onde plane passant par le point O, et dont toutes les molécules se meuvent simultanément dans une certaine direction; la direction du mouvement propagé dépendra à la fois de la position du plan de l'onde et de la direction du mouvement dans l'onde. Si le plan de l'onde coïncide avec le plan YOZ, et que les mouvements de l'éther dans l'onde soient parallèles à l'axe OY, les mouvements se propageront parallèlement à OX avec une vitesse b, en conservant leur direction. Si les mouvements étaient parallèles à OZ, le même effet aurait lieu, mais la vitesse de transmission serait c. Il résulte de là qu'une onde plane perpendiculaire à un des trois axes d'élasticité, et polarisée parallèlement ou perpendiculairement à un des autres axes, se propage sans se diviser et en conservant son plan de polarisation.

1618. Supposons maintenant que le plan de l'onde, passant toujours par le point O, ait une direction quelconque, ainsi que les mouvements oscillatoires de l'éther. Comme la réaction, suivant la direction du mouvement, sera toujours accompagnée d'une autre force perpendiculaire, d'une intensité et d'une direction variable, il s'ensuit que la direction du mouvement de l'éther ne se propagera pas parallèlement, et qu'il sera constamment détourné de sa direction par la force perturbatrice, et qu'il en résultera un mouvement qu'il serait assez difficile de suivre. Mais Fresnel a démontré que, pour chaque position du plan de l'onde, il y a deux direc-

tions du mouvement de l'éther pour lesquelles les mouvements élémentaires se propagent parallèlement : celles du plus grand et du plus petit rayon vecteur de la surface d'élasticité renfermés dans le plan de l'onde. Dans ces deux circonstances, la force perturbatrice, perpendiculaire au rayon vecteur de la surface d'élasticité, devient normale au plan de l'onde, et se trouve sans influence sur la transmission des vibrations. Si les mouvements primitifs n'avaient point les directions dont nous venons de parler, la force perturbatrice les y amènerait immédiatement. Les deux mouvements élémentaires se propageront avec des vitesses représentées par les longueurs des rayons vecteurs dont ils ont la direction; et, comme ils sont en général inégaux, l'intervalle qui sépare deux points correspondants sera d'autant plus grand qu'ils auront parcouru une plus grande épaisseur du cristal. Les deux systèmes d'ondes produites se séparent d'ailleurs par l'inclinaison des surfaces des ondes qui les propagent : car les normales forment, avec la perpendiculaire à la surface d'incidence, des angles dont les sinus sont dans le rapport direct des vitesses de propagation des ondes, comme nous l'avons vu en parlant de la réfraction.

Ainsi, un faisceau de lumière naturelle ou polarisée se divisera toujours en deux faisceaux polarisés dans deux plans rectangulaires, parallèles chacun à un des axes de la section de la surface d'élasticité.

1619. En discutant l'équation de la surface d'élasticité, on trouve qu'elle peut toujours être coupée par deux plans diamétraux suivant deux cercles; ces plans passent par l'axe moyen, et sont symétriquement placés par rapport aux deux autres. En supposant que b soit l'axe moyen, les tangentes des angles de ces plans avec celui des axes a et c ont pour valeur

$$\pm\sqrt{\frac{a^2-b^2}{b^2-c^2}}.$$

Les ondes parallèles à ces plans ne pourront alors avoir qu'une seule vitesse de propagation, et les mouvements élémentaires, quelle que soit leur direction, ne pourront éprouver aucune déviation. Par conséquent, les rayons qui pénétreront dans le corps, perpendiculairement à ces plans diamétraux, n'éprouveront ni double réfraction ni déviation dans leurs plans de polarisation : ces directions sont alors celles des axes optiques des cristaux à deux axes. Ainsi les

axes optiques sont situés dans le plan des axes de plus grande et de plus petite élasticité, et également inclinés sur leurs directions. Quand deux des trois axes d'élasticité sont égaux, les sections circulaires se confondent et deviennent perpendiculaires au troisième axe; alors les deux axes optiques se réduisent à un seul.

D'après cela, les axes optiques des cristaux sont les directions dans lesquelles des faisceaux de rayons parallèles ou des ondes planes se propagent sans éprouver ni division ni changement dans leurs plans de polarisation.

Il est bien important de remarquer qu'il est question d'un large faisceau de lumière correspondant à une onde plane, et non pas d'un rayon de lumière correspondant à un élément d'onde, car les phénomènes qui se produisent dans les deux cas sont souvent très-différents. En effet, lorsqu'une onde plane se propage en conservant sa direction, la direction de propagation du mouvement est toujours perpendiculaire à la direction de l'onde, attendu que les actions exercées par les molécules d'éther d'une onde, sur celles qui sont au delà, sont toujours symétriques de part et d'autre du plan mené par la direction du mouvement perpendiculairement au plan de l'onde. Mais il n'en est plus ainsi quand il ne s'agit que d'un élément d'onde, d'un rayon : la propagation peut avoir lieu suivant des directions plus ou moins inclinées au plan de l'élément.

Nous allons voir d'ailleurs de nombreuses confirmations de la distinction que nous venons d'établir.

1620. Les quantités a, b, c, représentant les vitesses de propagation de la lumière perpendiculairement aux trois axes d'élasticité, sont en raison inverse des indices qu'on obtiendrait en taillant dans un cristal trois prismes dont les arêtes de chacun seraient parallèles à un des axes, et observant dans un plan perpendiculaire aux arêtes l'indice du rayon qui suit la loi de Descartes; il y en a toujours un qui satisfait à cette condition : car la lumière incidente devra se diviser en deux faisceaux polarisés, l'un parallèlement, l'autre perpendiculairement aux arêtes parallèles du prisme; mais dans ce dernier, les mouvements vibratoires étant parallèles à un des axes, la vitesse de transmission devient indépendante de l'angle d'incidence, et, par conséquent, la loi de Descartes subsiste.

Dans un grand nombre de cas, les phénomènes de coloration décrits au n° 1499 permettent facilement de déterminer la position des axes optiques, et par suite celle des axes d'élasticité. M. Rudberg a fait ces expériences pour la topaze incolore et l'aragonite, en

employant successivement les rayons colorés correspondants aux raies B, C, D, E, F, G, H. Voici les résultats obtenus :

Raies.	$\frac{1}{a}$	$\frac{1}{b}$	$\frac{1}{c}$
		Aragonite.	
B.....	1,52749.....	1,67631.....	1,68061
C.....	1,52820.....	1,67779.....	1,68203
D.....	1,53013.....	1,58157.....	1,68589
E.....	1,53264.....	1,68634.....	1,69084
F.....	1,53479.....	1,69053.....	1,69516
G.....	1,53882.....	1,69836.....	1,70318
H.....	1,54226.....	1,70509.....	1,71011
		Topaze incolore.	
B.....	1,60840.....	1,61049.....	1,61791
C.....	1,60935.....	1,61141.....	1,61880
D.....	1,61161.....	1,61375.....	1,62109
E.....	1,61462.....	1,61668.....	1,62408
F.....	1,61701.....	1,61914.....	1,62652
G.....	1,62154.....	1,62365.....	1,63123
H.....	1,62539.....	1,62745.....	1,63506

1621. Examinons maintenant comment les surfaces des ondes transmises pourront être déterminées. Considérons un faisceau de rayons parallèles à l'instant où l'onde PI arrive à la surface MN d'un milieu cristallisé (fig. 928 A) : le rayon LI pénètrera d'abord, et successivement tous les autres, et tous parcourront des directions parallèles. Supposons que Q soit la position du petit mouvement apporté par le rayon LI après l'unité de temps : si nous supposons que IR représente la vitesse de la lumière dans le premier milieu, en prenant le point S de manière que PS = RI, le mouvement qui était au point P, quand celui qui était en I a pénétré dans le cristal, sera en S quand le premier est arrivé en Q, et celui qui était en T est arrivé en un point X tel que UX : IQ : : SP : TU. Ainsi les points S, X et Q sont en ligne droite : donc, tous les mouvements qui existaient dans l'onde PI se trouvent après l'unité de temps sur la ligne SQ; et, comme il en sera de même de tous les plans de rayons, parallèles à la figure ; que pour tous, les points correspondants à S seront sur une ligne S'S'' tracée sur la surface du cristal perpendiculaire au plan d'incidence, il s'ensuit que les plans des ondes transmises après l'unité de temps passent par la ligne S'S'', et sont perpendiculaires au plan d'incidence. Alors, pour déterminer leurs directions, il faudra par le point I et dans le plan

d'incidence (fig. 928 B) tracer deux cercles ayant pour rayons, l'un le plus grand, l'autre le plus petit rayon vecteur de la surface d'élasticité, renfermés dans le plan de l'onde incidente; prendre IR = 1, IS = 1 : sin i, et par le point S mener les tangentes aux cercles : les plans élevés par ces lignes perpendiculairement au plan d'incidence seront les plans cherchés.

Les deux plans de polarisation seront évidemment perpendiculaires aux axes de la section diamétrale de la section de la surface d'élasticité. Fresnel a démontré que chacun de ces plans divise en deux parties égales les angles dièdres formés par les deux plans menés suivant la normale à l'onde, et les deux normales aux plans des sections circulaires de la surface d'élasticité.

1622. *Surface des ondes.* Si l'on conçoit une onde plane passant par le point O (fig. 928), dans laquelle les mouvements se propagent parallèlement, après le temps t elle atteindra une certaine position; et si l'on conçoit que des ondes planes, ayant toutes les directions possibles autour du point O, partent simultanément, après le temps t elles seront toutes tangentes à une certaine surface, qui sera la surface de l'onde provenant du rayonnement du point O dans toutes les directions. Fresnel a trouvé, pour la surface de l'onde, l'équation suivante :

$$(x^2+y^2+z^2)(a^2x^2+b^2y^2+c^2z^2)-(b^2+c^2)a^2x^2$$
$$-(a^2+c^2)b^2y^2-(a^2+b^2)c^2z^2+a^2b^2c^2=0.... \quad (a).$$

Cette équation représente la surface de l'onde, en supposant, comme nous l'avons dit, que le point d'incidence soit ébranlé simultanément dans toutes les directions; c'est ce qu'on réaliserait, du moins en grande partie, en plaçant ce point au foyer principal d'une lentille éclairée par des rayons parallèles. Toutes les fois que la lumière provient d'un corps ayant un diamètre apparent sensible, la surface de l'onde, plus ou moins limitée dans son étendue, appartient toujours à la surface représentée par l'équation (a), à cause de l'influence mutuelle des rayons voisins. Ce n'est que dans le cas de rayons exactement parallèles que la surface de l'onde est plane et tangente à cette surface. Il résulte de là que les rayons élémentaires se propagent autrement que les ondes planes : car, pour les premiers, le mouvement de translation est généralement oblique aux plans des ondes élémentaires, puisque les plans tangents de la surface générale ne sont pas perpendiculaires aux rayons vecteurs qui passent par les points de contact. L'équation (a) permet faci-

lement de déterminer, dans tous les cas, les plans des ondes ou les rayons après la réfraction.

1623. Supposons que les valeurs de $a, b, c,$ qui représentent les vitesses de propagation parallèlement aux trois axes d'élasticité, soient connues en nombres pour les différents rayons colorés, en prenant pour unité la vitesse de propagation de la lumière dans le vide; qu'on construise la surface représentée par l'équation (a), en prenant une certaine longueur pour représenter l'unité de vitesse, et pour centre un point de la surface du cristal biréfringent. Lorsqu'on connaîtra la direction du plan de l'onde incidente, il sera facile de déterminer celle de l'onde réfractée; il suffira, pour cela, de mener à la surface générale de l'onde un plan tangent par une ligne de la surface d'incidence, déterminée comme nous l'avons dit précédemment, ou comme dans la construction d'Huyghens, ce plan sera celui de l'onde cherchée. S'il s'agit d'un rayon incident isolé, on obtiendra la direction du rayon réfracté en joignant le point de tangence avec le point d'incidence. L'équation (a) étant du quatrième degré, on peut, en général, par une droite extérieure, mener quatre plans tangents à la surface qu'elle représente; mais il est facile de voir que deux d'entre eux iraient la toucher au-dessus de la surface d'incidence, et sont étrangers à la question.

Quant aux directions des plans de polarisation, on les obtient en projetant le rayon vecteur de l'onde sur le plan tangent à son extrémité, le plan projetant est le plan de polarisation du rayon : car la direction des mouvements de l'éther restant toujours la même, la déviation du rayon n'a pu avoir lieu que perpendiculairement à ces mouvements, et, par conséquent, le plan perpendiculaire à l'élément de l'onde passant par le rayon est perpendiculaire aux mouvements élémentaires.

1624. Fresnel a démontré que, dans les cristaux à deux axes, les vitesses V et V′ des rayons qui traversent le cristal dans une direction commune, faisant avec les deux axes optiques des angles A et A′, sont liées par l'équation

$$\frac{1}{V^2} - \frac{1}{V'^2} = \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{c^2}\right) \sin A \sin A' \ldots. \quad (b).$$

Il faut bien remarquer que, dans toutes les formules précédentes, b est l'axe moyen d'élasticité, et, par conséquent, que, si l'on supposait $a = c$, il s'ensuivrait nécessairement que les trois axes seraient égaux; et que ces dernières formules sont relatives aux

rayons qui suivent la même direction, et non pas aux deux rayons conjugués qui proviennent d'un même rayon incident, excepté quand il s'agit des cristaux à un axe, attendu qu'alors, une des nappes de la surface de l'onde devenant sphérique, les formules sont applicables aux rayons ordinaire et extraordinaire qui s'accompagnent. Cependant, comme les deux rayons conjugués sont très-peu écartés, et que la courbure des nappes varie peu, en général, ces formules peuvent être appliquées aux rayons qui s'accompagnent.

La formule (*b*) a été donnée par M. Biot et M. Brewster, comme résultat de l'expérience, longtemps avant que Fresnel ait fait connaître la théorie générale de la double réfraction; mais $1 : V^2$ et $1 : V'^2$ étaient remplacés par V^2 et V'^2, parce que, dans le système de l'émission alors adopté, la vitesse de la lumière est la vitesse renversée dans le système des ondulations; en outre, la formule était relative aux vitesses des deux rayons conjugués.

1625. *Discussion de l'équation de la surface de l'onde.* Supposons que deux des trois axes d'élasticité deviennent égaux, par exemple que $c = b$, la formule (*a*) devient

$$(x^2 + y^2 + z^2 - b^2)(a^2x^2 + b^2y^2 + b^2z^2 - a^2b^2) = 0,$$

qui se décompose en deux autres :

$$x^2 + y^2 + z^2 - b^2 = 0, \text{ et } a^2x^2 + b^2y^2 + b^2z^2 - a^2b^2 = 0.$$

La première représente une sphère dont le rayon est b, la seconde un ellipsoïde de révolution dont le rayon de l'équateur est b; a et b étant les vitesses des rayons extraordinaire et ordinaire, $\frac{1}{a}$ et $\frac{1}{b}$ sont les indices correspondants : on retrouve ainsi la construction d'Huyghens donnée au n° **1449**.

1626. Revenons maintenant au cas général dans lequel les vitesses a, b, c sont toutes différentes, et déterminons les sections de la surface d'élasticité par les trois plans coordonnés : on trouve

$$x = 0,\ (y^2 + z^2 - a^2)(b^2y^2 + c^2z^2 - b^2c^2) = 0;$$
$$y = 0,\ (z^2 + x^2 - b^2)(c^2z^2 + a^2x^2 - a^2c^2) = 0;$$
$$z = 0,\ (x^2 + y^2 - c^2)(a^2x^2 + b^2y^2 - a^2b^2) = 0.$$

Ainsi, les traces sont composées d'un cercle et d'une ellipse; d'après l'hypothèse admise pour les valeurs relatives de a, b et c, les fig. 729, 730, 731 représentent les trois intersections de la surface par les plans YZ, XZ et XY.

Dans la première et la troisième, une des courbes est extérieure à l'autre, dans la deuxième elles se coupent aux points a, b, c, d; et il est facile de voir, d'après ce que nous avons dit précédemment, que les lignes qui joignent ces points d'intersection diffèrent des axes optiques.

Considérons d'abord le cas où le rayon incident est perpendiculaire à la surface du cristal, ses axes ayant une position quelconque par rapport à sa surface. Pour obtenir les directions des rayons transmis, il faudra construire la surface de l'onde et lui mener un plan tangent parallèle à la surface du cristal. Il est facile de voir que, quand les axes d'élasticité seront parallèles ou perpendiculaires à la surface d'incidence, il y aura toujours deux plans tangents; mais les points de tangence seront toujours situés sur la normale à la surface du cristal au point d'incidence : ainsi les rayons transmis suivront la même direction, mais avec des vitesses différentes. Dans le cas où le rayon incident serait complétement polarisé dans un plan perpendiculaire à un des axes, il est évident que l'intensité de l'un des deux rayons transmis deviendrait nulle : alors il n'y aurait qu'un seul rayon réfracté dont le plan de polarisation serait le même que celui du rayon incident. Si, au lieu d'un rayon très-délié, on avait une onde plane incidente, les ondes réfractées resteraient évidemment parallèles.

Mais, si la surface du cristal n'est perpendiculaire à aucun des trois axes, il y aura toujours deux plans tangents distincts, et, par conséquent, le rayon incident se divisera en deux autres, qui suivront des routes différentes et plus ou moins écartées de la normale.

1627. En cherchant les directions dans lesquelles les deux vitesses deviennent égales, on trouve que ces directions coïncident avec les diagonales qui joignent deux à deux les quatre points d'intersection du cercle et de l'ellipse dans la section de la surface de l'onde par le plan perpendiculaire à l'axe moyen (fig. 930). Ces lignes diffèrent des normales aux sections circulaires de la surface d'élasticité, c'est-à-dire avec les axes optiques pour les ondes planes; mais ils en sont très-voisins : la tangente de l'angle qu'ils forment avec l'axe de plus grande élasticité est

$$\frac{a\sqrt{b^2-c^2}}{c\sqrt{a^2-b^2}}.$$

1628. En discutant l'équation de la surface des ondes, M. Ha-

milton a reconnu que, dans les deux directions où les deux plans tangents se réduisaient à un seul, les points de tangence étaient en nombre infini, et distribués suivant une petite courbe fermée, sensiblement circulaire : les plans qui jouissent de cette propriété passent par les tangentes communes au cercle et à l'ellipse résultant de l'intersection de la surface par un plan perpendiculaire à l'axe moyen, et sont perpendiculaires à ce plan; ces quatre tangentes communes sont parallèles deux à deux, et perpendiculaires aux axes optiques (normales aux sections circulaires de la surface d'élasticité). Il résulte de là que, si un cristal était taillé parallèlement à deux de ces plans tangents communs, et s'il recevait un rayon incident normal, le rayon réfracté serait déterminé par le point de contact avec la surface de l'onde d'un plan tangent parallèle à la surface d'entrée; mais, comme alors il y aurait une infinité de points de contact, le rayon réfracté formerait un cône creux, et ces rayons, à l'émergence, devant reprendre la direction primitive, devraient former un cylindre creux ayant un diamètre constant. Cette conséquence si remarquable de la théorie de Fresnel a été vérifiée par M. Lloyd.

Avant d'exposer les détails des expériences, remarquons d'abord qu'il n'est pas nécessaire que le cristal soit taillé comme nous l'avons indiqué; il suffit que le rayon traverse le cristal dans la direction d'un des axes optiques, car alors le plan tangent qui déterminera sa position dans la surface de l'onde devra être tangent aux deux nappes. M. Lloyd a employé un cristal d'aragonite, taillé perpendiculairement à la ligne moyenne; la lumière partait d'une lampe placée à distance, et, pour réduire autant que possible la largeur du faisceau, il le faisait passer à travers deux petites ouvertures, l'une pratiquée dans un écran placé près de la flamme, la seconde dans une plaque mince de métal placée sur la première face du cristal. Dans les circonstances ordinaires, en observant avec une lentille, on voyait deux images; mais, en faisant varier progressivement l'incidence, les deux images se confondaient, et on apercevait un anneau brillant. M. Lloyd, en employant de la lumière solaire, s'est assuré que son diamètre ne changeait pas avec la distance.

1629. M. Hamilton a encore remarqué dans la surface de l'onde une circonstance fort importante : les intersections du cercle et de l'ellipse (fig. 930) sont des ombilics, c'est-à-dire qu'en ces points la surface a la forme d'un cône évasé, et, par conséquent,

qu'il y a une infinité de plans tangents qui passent par ces points. Il résulte de là qu'un faisceau incident formant un cône creux pourra donner un seul rayon réfracté dirigé suivant sa ligne ombilicale; les plans d'incidence de ces rayons seront perpendiculaires aux intersections des plans tangents à l'ombilic avec la surface d'incidence, et les distances de ces lignes au point d'incidence représenteront 1 : sin i, i étant l'angle d'incidence; et, réciproquement, le rayon réfracté émergera en un cône creux, car il doit être disposé de la même manière relativement aux deux surfaces. Pour vérifier cette conséquence de la théorie, M. Lloyd a placé une lentille à court foyer à sa distance focale de la première surface de la plaque d'aragonite, de manière que la partie centrale du faisceau se réfracte sensiblement suivant la ligne ombilicale; une plaque mince de métal, percée d'un petit orifice, fut placée sur la surface du cristal voisine de l'œil. Lorsque l'ajustement était exact, on voyait un cercle lumineux avec un petit espace obscur au centre, et, dans cet espace central obscur, deux points brillants séparés par une ligne étroite et bien définie; quand l'ouverture de la plaque était légèrement déplacée, le phénomène changeait rapidement, l'anneau blanc se réduisait à une petite fraction de son étendue. En opérant avec des rayons solaires, on reconnut que la section du cône émergent augmentait avec la distance.

La fig. 1044 représente l'appareil construit par M. Soleil pour vérifier le dernier fait dont nous venons de parler : a est une lentille fixée au centre d'un écran qu'on éclaire avec la lumière des nues ou la flamme d'une lampe placée à une grande distance; au foyer de la lentille se trouve une plaque d'aragonite dont les faces sont perpendiculaires à un des axes; elle est appuyée sur une plaque mince percée d'un très-petit trou; elle peut tourner dans son plan et autour d'une ligne verticale; au delà et dans l'axe du faisceau se trouve un oculaire à deux verres. L'anneau lumineux s'aperçoit très-distinctement, et, quand on l'observe avec un prisme de Nicol, on y remarque une solution de continuité qui tourne avec le prisme, parce que les rayons de l'anneau sont polarisés dans des plans qui passent par son centre. Mais il faut beaucoup de tâtonnements pour amener la plaque dans la position convenable, attendu qu'elle n'est jamais taillée suivant des plans exactement perpendiculaires à l'axe.

1630. Il résulte de ce qui précède, que dans les cristaux à deux axes il n'existe aucune direction du rayon incident qui ne donne

qu'un seul rayon transmis : car, pour qu'il en fût ainsi, il faudrait que les deux nappes de la surface des ondes fussent tangentes à certains points, afin que par ces points on pût leur mener un plan tangent commun, et cette circonstance n'existe pas; il n'y a que le cas où, la surface étant parallèle à deux des axes d'élasticité, le rayon incident est normal et polarisé dans un plan passant par un des axes, que le rayon traverse le cristal sans déviation ni division.

Ainsi les axes optiques, définis comme nous l'avons fait pour les ondes planes, ne jouissent plus des mêmes propriétés pour des rayons isolés. Quelques physiciens regardent les lignes ombilicales comme les véritables axes obliques, qu'ils définissent par la propriété d'être parcourus avec la même vitesse par des rayons polarisés dans une direction quelconque.

Au reste, ces deux systèmes de lignes diffèrent très-peu dans les cristaux connus : car les tangentes des angles qu'ils forment avec l'axe de plus grande élasticité sont dans le rapport de $c:a$; or, dans la topaze $c:a=0,9939$, et, dans la chaux sulfatée anhydre, l'un des cristaux à deux axes, dont la double réfraction est la plus énergique, $c:a=0,9725$.

Coloration de la lumière polarisée par les lames minces cristallisées.

1631. Ce phénomène, que nous avons décrit avec beaucoup de détails [1596], a été expliqué par Fresnel avec une admirable précision. Avant d'entrer dans les détails de cette explication, nous donnerons un aperçu des principes sur lesquels elle repose.

1632. Considérons un faisceau de lumière polarisée, traversant perpendiculairement une plaque cristallisée d'une épaisseur convenable, que nous supposerons d'abord à un axe : le faisceau se divisera en deux parties, l'une traversera le cristal avec la vitesse ordinaire, l'autre avec la vitesse extraordinaire, et les ondes planes réfractées resteront parallèles à l'onde incidente. Ces deux systèmes d'ondes parallèles étaient d'accord à leur entrée dans la lame, puisqu'ils proviennent de la division d'un même système d'ondes; mais, à cause de l'inégalité de vitesse, ils ne seront plus d'accord à la sortie, de sorte qu'en reprenant dans l'air la même longueur d'ondulation, celui qui a marché le plus vite se trouvera en avance sur l'autre d'une certaine quantité. Alors, si les ondes pouvaient interférer, l'intensité du système d'ondes résultant varierait avec

l'avance d'un des deux systèmes sur l'autre, et, comme la différence de marche doit être estimée en fonction de la longueur d'ondulation dans l'air, les rayons de différentes teintes éprouveraient des variations d'intensité qui ne seraient point proportionnelles, et, par conséquent, la lumière serait colorée. Mais les deux systèmes d'ondes sont polarisés dans deux plans rectangulaires, et l'interférence ne peut rien changer, car alors, quelle que soit la différence de marche, l'intensité de l'onde résultante est égale à la somme des intensités des ondes composantes. Mais si les deux faisceaux émergents sont ramenés à un même plan de polarisation, ils pourront interférer, les couleurs se développeront, et le calcul conduit aux circonstances les plus minutieuses de l'observation.

1633. Soient PP′ (fig. 932) le plan primitif de polarisation, OO′ la section principale du cristal, i l'angle qu'elle forme avec le plan PP′, SS′ la section principale du rhomboïde, s l'angle qu'elle forme avec le plan primitif, λ la longueur d'ondulation, et F l'intensité de la vitesse des molécules de l'éther dans leurs oscillations. D'après la loi de Malus, les faisceaux polarisés suivant CO et CE auront pour intensité

$$\cos i\,F_o\,, \quad \text{et} \quad \sin i\,F_e.$$

Les petites lettres o et e placées au bas de F ne changent rien à la valeur de cette quantité : elles indiquent seulement la longueur des chemins parcourus au même instant par les rayons ordinaires et extraordinaires, après qu'ils sont sortis de la lame cristallisée, et déterminent ainsi, par leur différence $o-e$, l'intervalle qui sépare les points correspondants des deux systèmes d'ondes.

Chacun de ces faisceaux se divise en deux autres en traversant le rhomboïde, et il en résulte les quatre faisceaux dont les valeurs sont

$$\cos i \cos (i-s)\,F_{o+o'} \qquad \cos i \sin (i-s)\,F_{o+e'}$$
$$\sin i \sin (i-s)\,F_{e+e'} \qquad \sin i \cos (i-s)\,F_{e+e'}$$

Les deux premiers forment l'image ordinaire, et les deux derniers l'image extraordinaire. Mais les deux derniers faisceaux doivent nécessairement avoir des vitesses de signes contraires, indépendamment de la différence des chemins parcourus : car, à l'inspection seule de la figure, on voit que les mouvements oscillatoires perpendiculaires à CO et à CE donneront lieu à de petits mouvements perpendiculaires à CS, qui seront dirigés dans le même sens, tandis que ces mêmes mouvements donneront naissance à des mouvements perpendiculaires à CT, qui seront dirigés en sens contraire ; et il est facile de voir que l'image dont l'intensité dépend non-seulement de la différence des chemins parcourus, mais encore d'une différence d'une demi-ondulation dans les deux faisceaux constituants, est celle dont les deux faisceaux ont eu des plans de polarisation qui se sont toujours écartés ou rapprochés jusqu'à ce qu'ils se soient confondus ; et que l'image dans laquelle l'intensité ne résulte que des

différences de chemins est celle dont les faisceaux constituants ont eu des plans de polarisation qui ont éprouvé successivement deux mouvements contraires avant de se confondre.

Les vitesses d'oscillation dans l'image extraordinaire sont alors

$$F \cos i \sin (i - s), \quad \text{et} \quad - F \sin i \cos (i - s).$$

En appliquant ici la formule générale [1569]

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \left(\frac{c}{\lambda}\right),$$

dans laquelle a et a' représentent les vitesses d'oscillation des deux systèmes d'ondes, c la différence des chemins parcourus, et λ la longueur d'ondulation, on trouve, pour l'intensité de la lumière homogène dans l'image extraordinaire, en supprimant le facteur F, qu'on peut prendre pour unité,

$$\cos^2 i \sin^2 (i - s) + \sin^2 i \cos^2 (i - s) - 2 \sin i \cos i \sin (i - s) \cos (i - s) \cos 2\pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right),$$

ou

$$[\sin i \cos (i - s) - \cos i \sin (i - s)]^2 + 2 \sin i \cos i \sin (i - s) \cos (i - s) \left[1 - \cos 2\pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right)\right];$$

ou enfin $$\sin^2 s + \sin 2i \sin 2 (i - s) \sin^2 \pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right) \ldots. \quad (a).$$

En faisant un calcul semblable sur les deux faisceaux constituant l'image ordinaire, et observant que les vitesses des deux rayons sont dirigées dans le même sens, on trouve pour l'intensité de cette image

$$\cos^2 s - \sin 2 i \sin 2 (i - s) \sin^2 \pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right) \ldots. \quad (b).$$

Telles sont les formules générales qui donnent l'intensité de chaque rayon homogène dans les images ordinaire et extraordinaire, en fonction de la longueur d'ondulation et de la différence des chemins $o - e$, parcourus par les rayons qui ont traversé la lame cristallisée, estimée en longueur d'ondulation. Quand on connaîtra l'épaisseur de la lame et les vitesses des rayons ordinaire et extraordinaire, il sera facile de déterminer $o - e$. Comme, dans la plupart des cristaux qui possèdent la double réfraction, $o - e$ n'éprouve que de très-légères variations en raison de la différence de teinte des rayons lumineux, on pourra regarder cette quantité comme constante; alors, si, après avoir calculé sa valeur, on la divise successivement par les longueurs d'ondulation des sept principales couleurs, les formules (*a*) et (*b*) donneront les intensités de la lumière dans les deux images.

1634. Il résulte de ces formules plusieurs conséquences remarquables.

1°. Les intensités des deux images sont complémentaires, car leur somme est égale à l'unité, intensité du rayon incident; d'où il suit que, si la lumière incidente était blanche, le lieu où les images se superposeraient serait blanc, parce que les intensités des images de différentes teintes se trouveraient exac-

tement dans les mêmes rapports que dans la lumière incidente. La perte de lumière par la réflexion à la première et à la seconde surface du cristal n'apporterait aucune modification : car les rayons resteraient toujours dans les mêmes proportions relatives, puisque la lumière blanche n'est pas colorée par la réflexion ou la réfraction à travers les lames à faces parallèles dont nous nous occupons.

2°. Les images deviendront évidemment blanches quand le second terme sera nul : on a, par conséquent, pour cette circonstance, la condition

$$\sin 2i \sin 2(i-s) = 0,$$

qui peut être satisfaite, indépendamment de s, par $\sin 2i = 0$, d'où $i = 0$, $i = 90°$; et par $\sin 2(i-s) = 0$, d'où $2i - 2s = 0$, $2i - 2s = \pm 180°$, et $s = i$, $s = 90° + i$. Ainsi les images sont toujours blanches quand la section principale de la lame mince est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et, lorsque i étant quelconque, elle est parallèle ou perpendiculaire à la section principale du rhomboïde : c'est ce qui est d'ailleurs évident, car alors les images ordinaire et extraordinaire ne renferment chacune qu'un seul rayon qui a traversé ordinairement ou extraordinairement la lame mince. Mais, dans le premier cas, une des deux images disparaît pour $s = 0$ ou $s = 90°$, tandis que dans le second les deux images sont toujours visibles.

3°. Le maximum d'éclat des deux images a lieu quand le coefficient du second terme est le plus grand possible; quand i est constant et quelconque, ce maximum a lieu pour les valeurs de s qui donnent

$$2i - 2s = 90°, \quad \text{ou} \quad 2s - 2i = 90°, \quad 2s - 2i = 270°;$$

d'où

$$s = i + 45°, \quad s = i + 135°.$$

Mais le plus grand maximum d'éclat aura lieu quand $\sin 2i \sin 2(i-s)$ sera égal à l'unité ; ce qui arrivera quand

$$i = 45°, \quad \text{et} \quad s = 0, \quad \text{ou} \quad s = 90°.$$

4°. Dans la lumière blanche, et quand i est constant, la teinte de chaque image reste constante pour une même épaisseur du même cristal, dans l'intervalle angulaire correspondant à deux images blanches. En effet, l'intensité de chaque image élémentaire est composée de deux parties : l'une est constante, quelle que soit la couleur du rayon, et par conséquent donnera de la lumière blanche; l'autre varie avec la nature des rayons. Mais, le facteur variable étant indépendant de i et de s, les rayons de différentes couleurs seront toujours entre eux dans les mêmes rapports : par conséquent, la teinte résultante sera toujours la même, seulement l'intensité variera avec le facteur $\sin 2i \sin 2(i-s)$. Cela suppose cependant que le terme variable est positif; s'il était négatif, la teinte totale se composerait d'une certaine quantité de lumière blanche et de la teinte complémentaire à celle qui résulte du terme négatif : car, dans ce cas, le premier terme est toujours plus grand que le second, attendu que l'intensité de la lumière ne peut pas être négative, et qu'il existera toujours assez de lumière blanche pour produire la teinte complémentaire à celle qui résulte du deuxième terme. C'est ce qu'on peut

d'ailleurs facilement démontrer directement. Prenons d'abord la première formule : le second terme ne sera négatif que pour s plus grand que i ; or, comme le dernier facteur ne peut pas être négatif, et que sa plus grande valeur est 1, il suffit de démontrer qu'on a toujours $\sin^2 s > \sin 2i \sin 2(s-i)$; mais le maximum du deuxième facteur a lieu pour $2i = s$, car, si l'on pose $2i = s + x$, il vient $\sin(s+x)\sin(s-x)$, qui reste le même quand on change x en $-x$. Ainsi $2i = s$ correspond à un maximum ou à un minimum ; et c'est évidemment un maximum, car le produit

$$\sin(s+x)\sin(s-x) = \sin^2 s - \sin^2 x ;$$

mais alors l'intensité devient nulle. Pour la deuxième formule, le deuxième terme est négatif quand i est plus grand que s ; alors, i étant quelconque, la plus grande valeur a lieu quand $s = 0$, elle est alors $\sin^2 2i < 1$, tandis qu'on a $\cos^2 s = 1$. Remarquons maintenant que le second terme change de signe toutes les fois que l'image devient blanche, par conséquent cette image change aussi de teinte.

5°. Si l'on suppose s constant et égal à 0° ou à 90°, le coefficient du second terme des intensités des images devient $\sin^2 2i$; il ne change plus de signe, et, par conséquent, chaque image conserve la même teinte ; mais une des images disparaît pour $i = 0$, et $i = 90°$, $i = 180°$. C'est l'image extraordinaire dans le premier cas, et l'image ordinaire dans le second : alors l'autre image est blanche ; le maximum d'éclat a toujours lieu pour $i = 45°$.

6°. La lumière incidente doit être polarisée : car, si elle ne l'était pas, on pourrait la considérer comme formée de deux faisceaux d'egale intensité, polarisés dans deux plans rectangulaires, et chaque image résulterait de la superposition de deux images dont les intensités seraient complémentaires, non pas parce que l'une renfermerait l'angle i et l'autre $90 + i$, ce qui ne les changerait en rien, mais parce qu'en vertu du principe exposé précédemment, un des deux systèmes serait en retard d'une demi-longueur d'ondulation, et qu'alors, le terme variable disparaissant, la somme des intensités serait l'unité, quelle que fût d'ailleurs la différence de marche.

7°. Si, la lame étant éclairée par de la lumière homogène, i et s restant les mêmes, on augmentait progressivement son épaisseur, le dernier facteur du second terme de l'expression des intensités reprendrait périodiquement les mêmes valeurs aux accroissements d'épaisseurs qui correspondraient à une différence de marche d'un nombre entier de longueurs d'ondulation.

8°. Par les mêmes raisons que pour les anneaux colorés produits par les lames minces, les couleurs ne se manifesteront qu'autant que les épaisseurs des lames cristallisées seront comprises entre certaines limites.

1635. *Polarisation apparente de la lumière homogène qui sort de la lame mince.* Reprenons les formules générales, et supposons que la différence de marche des deux rayons soit égale à un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation. $(o-e) : \lambda$ sera un nombre entier, $\sin^2 \pi (o-e) : \lambda$ sera nul, et les intensités des deux images deviendront :

image extraordinaire..... $\sin^2 s$,
image ordinaire..... $\cos^2 s$;

l'image extraordinaire disparaît quand $s = 0$, et l'image ordinaire quand $s = 90°$.

Si $(o - e)$ est égal à un nombre impair de demi-longueurs d'ondulation, $\sin^2 (o - e) : \lambda$ devient égal à l'unité, et les intensités des deux images deviennent

$$\text{image extraordinaire}\ldots\ldots \quad \sin^2 s + \sin 2i \sin 2(i - s),$$
$$\text{image ordinaire}\ldots\ldots\ldots \quad \cos^2 s - \sin 2i \sin 2(i - s);$$

l'image extraordinaire disparaît pour $s = 2i$, et l'image ordinaire pour $s = 2i + 90°$. Ainsi la lumière homogène qui sort de la lame mince produit les mêmes apparences que si elle était polarisée dans le plan primitif ou dans l'azimut $2i$, suivant que la différence de marche est égale à un nombre pair ou à un nombre impair de demi-longueurs d'ondulation. En outre, dans le cas particulier où $i = 45°$, l'ensemble de la lumière paraît complétement dépolarisé quand la différence de marche est égale à un nombre impair de quarts d'ondulation, car alors les intensités des images sont toujours égales entre elles et à $1/2$, quel que soit s. En effet, dans ce cas

$$\sin^2 \pi (o - e) : \lambda = \frac{1}{2},$$

et les intensités des deux images deviennent :

$$\text{image extraordinaire}\ldots\ldots \quad \sin^2 s + \frac{1}{2} \cos 2s = \frac{1}{2},$$

$$\text{image ordinaire}\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \cos^2 s - \frac{1}{2} \cos 2s = \frac{1}{2}.$$

1656. Pour vérifier ces conséquences de la théorie on pourrait employer des plaques minces de différentes épaisseurs, déterminées de manière que, pour certains rayons, les différences de marche fussent d'un nombre pair ou impair de longueurs d'ondulation. Mais Fresnel a disposé l'expérience de manière qu'avec deux lames seulement on puisse vérifier à la fois les influences de toutes les épaisseurs.

Un rhomboïde de spath calcaire terminé par deux faces dressées avec soin et bien parallèles fut scié perpendiculairement à ces faces. On obtint ainsi deux rhomboïdes d'égale épaisseur; ils furent placés l'un devant l'autre de manière que les sections principales fussent perpendiculaires. Le système des deux rhomboïdes fut placé devant une glace verticale dépolie à la surface inférieure, et qui réfléchissait la lumière émanée d'un point lumineux sous l'angle de 35°. Ainsi là le système des deux rhomboïdes était traversé par un faisceau de lumière polarisé dans un plan horizontal. Les sections principales des rhomboïdes furent inclinées de 45° à l'horizon, et l'on observait les images avec un rhomboïde dont on pouvait faire varier à volonté l'inclinaison de la section principale. Il résulte de cette disposition, que les rayons qui sortaient du second rhomboïde étaient polarisés parallèlement et perpendiculairement à sa section principale, que la différence de marche des rayons ordinaires et extraordinaires dans les deux rhomboïdes était exactement compensée, et que les rayons émergents ordinaires et extraordinaires devaient faire un angle sen-

sible à cause de la grande épaisseur des rhomboïdes. Cependant, comme nous l'avons déjà vu, ces rayons ne produisent pas de franges, parce qu'ils sont polarisés dans deux plans rectangulaires; mais si l'on reçoit la lumière à travers un troisième rhomboïde, les rayons étant ramenés à un même plan de polarisation, on aperçoit deux systèmes de franges. Chacun d'eux est polarisé, l'un dans le plan de la section principale du deuxième rhomboïde, l'autre dans un plan perpendiculaire, comme il est facile de s'en assurer en faisant tourner la section principale du troisième rhomboïde : une des images disparaît lorsque cette section principale est parallèle ou perpendiculaire à celle du second. Supposons que la section principale du troisième rhomboïde soit fixée à 45° sur celle des deux premiers, c'est-à-dire parallèlement au plan primitif, circonstance qui produit les franges les plus brillantes, parce qu'alors chacun des deux faisceaux sortant du deuxième rhomboïde se partage également entre les images ordinaire et extraordinaire. Considérons maintenant les points correspondants des deux groupes de franges, et d'abord ceux qui en occupent le centre et qui répondent à des chemins égaux parcourus par les deux faisceaux : il est brillant dans l'image ordinaire, et noir dans l'image extraordinaire. Si l'on fait tourner la section principale du rhomboïde, la lumière reparaît graduellement au centre des franges de l'image extraordinaire et s'affaiblit en même temps au centre de l'autre. Les intensités sont égales quand la section principale du rhomboïde fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, et le centre de l'image ordinaire devient complétement obscur quand la section principale est perpendiculaire au plan primitif. Ainsi la réunion des lumières qui forment les centres des images présente toutes les propriétés d'une polarisation complète suivant le plan horizontal. Si l'on considère maintenant les points qui correspondent à une différence de chemin d'un quart d'ondulation dans la marche des faisceaux, on connaîtra qu'ils conservent toujours les mêmes intensités dans les deux images quand on fait tourner le rhomboïde, et que la lumière se comporte comme si elle était complétement dépolarisée. Si l'on passe aux points qui répondent à une différence de marche d'une demi-ondulation, ils sont complétement noirs dans l'image ordinaire et brillants dans l'image extraordinaire lorsque la section principale du rhomboïde est horizontale; et quand elle est verticale, c'est le contraire qui a lieu : ainsi la lumière totale de ces points est polarisée verticalement. En continuant à parcourir les divers points d'interférence des deux faisceaux lumineux, on trouve que la réunion de leur lumière est polarisée suivant le plan horizontal, c'est-à-dire parallèlement au plan primitif de polarisation, quand leur différence de marche est nulle ou égale à un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, et que la lumière totale est polarisée suivant le plan vertical, qui est ici l'azimut $2i$ quand la différence de marche est égale à un nombre impair de demi-ondulations, et qu'enfin dans tous les points intermédiaires la polarisation n'est que partielle, c'est-à-dire que pour une position quelconque de la section principale du rhomboïde, aucune des deux images ne disparaît.

Si, en laissant toujours les sections principales des deux premiers rhomboïdes perpendiculaires entre elles, on fait varier l'inclinaison des sections principales sur le plan primitif de polarisation dans toutes les positions du

système, les lignes des franges qui répondent à une différence de marche d'un nombre pair ou impair de demi-ondulations sont polarisées parallèlement au plan primitif ou dans l'azimut $2i$.

Les lames minces cristallisées présentent exactement les mêmes phénomènes; mais quand leur épaisseur est trop petite pour que les faisceaux émergents aient une divergence sensible, il faut les éclairer par la lumière d'un point réfléchie sur deux miroirs légèrement inclinés entre eux et disposés de manière que l'angle de réflexion diffère peu de celui qui correspond à la polarisation complète.

1637. *Effets produits par la superposition de plusieurs lames.* Supposons d'abord que les sections principales des lames soient parallèles, chaque rayon, en traversant une des lames, conservera son plan de polarisation. Par conséquent, les intensités des faisceaux émergents seront les mêmes que si la lumière n'avait traversé qu'une seule lame; mais la différence des chemins sera égale à la somme des différences correspondantes à chaque lame. Si les sections principales étaient les unes parallèles, les autres perpendiculaires, la même chose aurait encore lieu; mais ce serait tantôt le rayon ordinaire, tantôt le rayon extraordinaire d'une lame qui traverserait extraordinairement la suivante.

S'il n'y avait que deux lames de même nature, et si les sections principales étaient parallèles, il est évident que les effets seraient les mêmes que si la lumière traversait une seule plaque dont l'épaisseur serait égale à la somme des épaisseurs des deux lames; et si les sections principales étaient perpendiculaires, les effets seraient les mêmes que si la plaque avait une épaisseur égale à la différence des épaisseurs des deux lames. On peut alors avec des plaques épaisses croisées produire les couleurs qu'on obtient par une seule lame mince.

Si les deux lames superposées étaient de nature différente, les sections principales parallèles ou croisées, les différences de vitesse des rayons ordinaires et extraordinaires étant dans le même sens ou en sens contraire, en désignant par $o - e$ et $o' - e'$ les différences de marche dans la première et la deuxième, il est évident que l'effet produit correspondrait à une lame pour laquelle la différence des marches serait $(o - e) \pm (o' - e')$.

Supposons maintenant que les lames soient en nombre quelconque, de nature différente, et que les sections principales soient aussi inclinées entre elles d'une manière quelconque : les intensités des faisceaux polarisés parallèlement et perpendiculairement aux sections principales des lames successives s'obtiendront comme dans le cas d'une seule lame; mais le nombre des faisceaux qui constitueront les images définitives croîtra avec le nombre des lames. Il est facile de voir que pour chaque nouvelle lame, le nombre des faisceaux polarisés suivant la section principale ou perpendiculairement sera double de ceux qui constituaient les images ordinaire et extraordinaire de la lame précédente, puisque, en général, chacun des deux faisceaux d'une lame entre comme partie constituante dans l'image ordinaire et extraordinaire de la lame suivante. Nous avons vu que pour une seule lame ces faisceaux sont au nombre de deux, pour deux lames ils seraient au nombre de quatre, et ainsi de suite. Chacun de ces faisceaux n'ayant pas traversé le système des lames avec la même vitesse, ils seront en général en retard les uns sur les autres d'une

certaine quantité, qu'on calculera facilement quand on connaîtra les épaisseurs des lames et les vitesses ordinaire et extraordinaire perpendiculairement à leurs faces. Alors pour obtenir la résultante de chacun des systèmes d'ondes qui constituent les images ordinaire et extraordinaire finales, il faudra calculer les résultantes successives. Tous ces calculs seraient très-longs, mais ne présenteraient aucune difficulté.

1638. *Coloration des plaques inclinées sur le faisceau incident.* Si une plaque mince était inclinée sur le faisceau incident, rien ne serait changé, si ce n'est l'épaisseur et la différence des vitesses avec lesquelles les rayons ordinaires ou extraordinaires la traversent, car les faisceaux émergents reprendraient leur parallélisme à la sortie. Il est facile de voir que l'influence de l'inclinaison variera suivant la position des axes optiques : tantôt l'inclinaison diminuera la différence des vitesses, tantôt elle l'augmentera; et, comme l'effet de l'inclinaison est d'augmenter l'épaisseur du cristal traversé par la lumière, l'effet final sera celui qu'on obtiendrait si la lumière traversait perpendiculairement la plaque, dont l'épaisseur serait diminuée ou augmentée.

1639. *Coloration des plaques par la lumière convergente.* Jusqu'ici nous avons supposé que le faisceau de lumière qui traversait la lame correspondait à une onde plane : alors tous les points de la lame se comportaient de la même manière, et la teinte était uniforme. Supposons maintenant que la lumière qui traverse la lame forme un large cône dont le sommet soit dans l'œil; et pour commencer par le cas le plus simple, supposons que la plaque mince soit à un axe, et que l'axe soit perpendiculaire aux faces de la lame et parallèle à l'axe du cône de lumière.

1640. Soient MN (fig. 933) la plaque perpendiculaire à l'axe, PP′ le plan primitif de polarisation, et supposons d'abord que la section principale de la tourmaline soit parallèle à PP′ : dans ce cas on apercevra seulement l'image extraordinaire. Considérons un point m de la plaque : les rayons qui en sortiront seront polarisés suivant mo et pq, car mo représente pour le point m la direction de la section principale. Reprenons la formule qui représente l'intensité du rayon extraordinaire, et, pour l'appliquer au cas dont il s'agit, faisons $s = o$, elle deviendra

$$\sin^2 2i \sin 2\pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right).$$

Cette expression devient nulle, quelle que soit la différence des chemins, quand $i = 0$, ou $i = 90°$. Ainsi il n'y aura pas de lumière propagée dans la direction des lignes PP′ et CC′. Cette expression devient aussi nulle, quel que soit i, quand $(o - e) : \lambda$ est égal à 1, 2, 3, 4, etc. ; mais les différences de chemins sont les mêmes pour les rayons également inclinés sur l'axe, et cette différence des chemins augmente à mesure que les rayons sont plus inclinés, et parce que ces rayons traversent une plus grande épaisseur du cristal, et parce que la différence des vitesses des deux rayons augmente à mesure qu'ils s'inclinent davantage sur l'axe (fig. 934). Ainsi l'image renfermera une série de bandes obscures circulaires concentriques. Remarquons maintenant que, quand $(o - e) : \lambda$ reste constant, ce qui arrive pour les différents points d'un cercle

concentrique au point o, l'intensité de la lumière est à son maximum quand $i = 45$, et qu'elle décroît depuis cette limite jusqu'à $i = 0$ et $i = 90^0$. Aussi les bandes brillantes interposées entre les cercles obscurs ont des intensités croissantes depuis $i = 0$ et $i = 90$ jusqu'à $i = 45^0$. Si maintenant on suppose que la lumière incidente soit blanche, comme les anneaux de différentes teintes n'auront pas les mêmes positions, leur superposition produira des anneaux irisés dont le système sera coupé par une croix noire.

Si la section principale de la tourmaline était perpendiculaire au plan primitif de polarisation, l'image serait complémentaire et, par conséquent, elle serait coupée par une croix blanche; et si l'on suppose que la section principale de la tourmaline passe graduellement de la première à la dernière position, la première image se transformera graduellement dans la seconde. On retrouve ainsi par la théorie toutes les particularités des phénomènes.

1641. Il résulte de cette explication, que les anneaux formés par les cristaux à un axe sont les mêmes, qu'ils soient positifs ou négatifs; les teintes y sont distribuées de la même manière. Mais quand on superpose deux plaques perpendiculaires à l'axe, il est évident que l'effet produit sera égal à la somme ou à la différence des effets produits par chacune d'elles, suivant que les plaques appartiendront à des cristaux de même signe ou de signe contraire. Il résulte de là une méthode très-simple pour reconnaître le signe d'un cristal; il suffit de placer une plaque mince du cristal perpendiculaire à l'axe sur une plaque de chaux carbonatée aussi perpendiculaire à l'axe, et d'observer si, par la superposition, l'effet produit est le même que celui qui résulterait d'une augmentation ou d'une diminution d'épaisseur du premier cristal; c'est-à-dire si les diamètres des anneaux diminuent ou augmentent; dans le premier cas le cristal sera négatif, et il sera positif dans le second.

Si l'axe optique de la lame mince n'était point perpendiculaire aux faces, les différences des vitesses des deux rayons ne seraient plus les mêmes sous des inclinaisons égales sur la normale, et les lignes isochromatiques ne seraient plus circulaires.

Dans ce cas, et dans celui plus général où, le cristal étant à un axe ou à deux axes, les axes sont disposés d'une manière quelconque, la détermination des courbes isochromatiques serait un problème compliqué, mais qu'on parviendrait certainement à résoudre par les principes que nous avons développés, en supposant que les vitesses des deux rayons des différentes teintes soient connues pour toutes les directions.

1642. Les couleurs développées par la chaleur, la trempe et la compression, n'ont certainement pas une autre origine que l'inégalité d'élasticité dans les différentes directions. Une expérience qui met ce rapprochement hors de doute, c'est l'identité des résultats qu'on obtient avec une plaque circulaire trempée, ou uniformément comprimée dans tous les points de la circonférence, avec ceux des plaques des cristaux à un axe taillées perpendiculairement à l'axe.

Polarisation circulaire.

1643. Fresnel a désigné ainsi un état particulier du mouvement oscillatoire des molécules de l'éther et qui conduit à une explication très-remar-

quable de la polarisation rotative. Considérons une molécule d'éther vibrant sous l'influence d'ondes polarisées; elle oscillera comme un pendule autour de sa position primitive, et sa vitesse à chaque instant sera donnée par la formule

$$v = a \sin 2\pi t,$$

a étant sa vitesse maximum. Mais la vitesse étant le rapport entre l'accroissement de l'espace parcouru et l'accroissement du temps, on aura

$$v = dx : dt.$$

Et si l'on compte les chemins à partir de la position de repos, comme les temps sont toujours comptés à partir de l'extrémité de l'oscillation, les accroissements du chemin parcouru et du temps seront de signe contraire, et nous aurons

$$-\frac{dx}{dt} = a \sin 2\pi t; \quad \text{d'où} \quad x = \frac{a}{2\pi} \cos 2\pi t \ldots. \ (a).$$

Si la même molécule d'éther était soumise à l'action d'un autre système d'ondes de même longueur, ayant une intensité a', polarisée dans un plan perpendiculaire, et en retard sur la première d'une quantité c, en désignant par y la distance de la molécule à sa position primitive, si elle était seulement soumise à l'influence de ce second système d'ondes, on aurait de même

$$y = \frac{a'}{2\pi} \cos 2\pi (t - c) \ldots. \ (b);$$

et pour obtenir l'équation de la trajectoire que parcourra la molécule d'éther sous l'influence des deux systèmes d'ondes, il suffit évidemment d'éliminer le temps t entre les deux équations (a) et (b). En effectuant les calculs, on tombe sur une équation du quatrième degré. Mais si on suppose que $c = 1/4$, c'est-à-dire qu'un des deux systèmes d'ondes soit en retard d'un quart d'ondulation, il viendra

$$\cos 2\pi (t - c) = \cos \left(2\pi t - \frac{\pi}{2}\right) = \sin 2\pi t, \quad \text{et} \quad y = \frac{a'}{2\pi} \sin 2\pi t \ldots. \ (b');$$

les équations (a) et (b') donnent alors

$$4\pi^2 a^2 y^2 - 4\pi^2 a'^2 x^2 = a^2 a'^2,$$

équation d'une ellipse dont les axes sont les amplitudes d'oscillation des deux systèmes d'ondes divisées par 2π.

Si les intensités a et a' sont égales, l'équation de la trajectoire devient

$$y^2 + x^2 = \frac{a^2}{4\pi^2}.$$

Pour déterminer les vitesses avec lesquelles la molécule d'éther parcourt ces trajectoires, il faut évidemment faire la somme des composantes parallèles à la tangente des vitesses connues parallèlement aux axes. En considérant le cas général où la trajectoire est une ellipse, on trouve une formule assez compliquée, qui indique que la vitesse est variable, mais qu'elle redevient la même quand la molécule est de retour au même point. Quand la trajectoire

est circulaire, les cosinus des angles de la tangente avec les axes des x et des y sont représentés par $2\pi y : a$, et $2\pi x : a$, et la vitesse V devient

$$V = \frac{2\pi}{a} \times \frac{a}{2\pi} \sin 2\pi t \times a \sin 2\pi t + \frac{2\pi}{a} \cdot \frac{a}{2\pi} \cos 2\pi t \times a \cos 2\pi t = a.$$

Quant au sens du mouvement de rotation, il est évident qu'il changerait si l'onde qui est en avance sur l'autre d'un quart d'ondulation reculait de manière à être en arrière de la même quantité.

Il résulte de tout ce que nous venons de dire que, si deux systèmes d'ondes polarisées dans deux plans rectangulaires ont une différence de marche égale à un quart d'ondulation, les molécules d'éther décrivent des ellipses autour de leur position initiale, et des cercles quand les ondes ont la même intensité; que ces petites trajectoires sont parcourues pendant la durée d'une vibration avec une vitesse variable quand elles sont elliptiques, et avec une vitesse constante quand elles sont circulaires. Il est évident que, dans ces nouvelles espèces d'ondes, le plan de polarisation tourne et effectue une révolution complète dans la durée d'une vibration.

1644. Examinons maintenant les propriétés dont ces nouvelles ondes doivent jouir, en partant de leur constitution. Si l'on recevait un système d'ondes polarisées circulairement sur une lame de verre et sous l'incidence de la polarisation complète, il est évident que, quelle que fût la direction du plan de réflexion, l'image conserverait toujours la même intensité; car dans un temps excessivement court il se présenterait des ondes polarisées dans tous les azimuts possibles, et l'on obtiendrait le même effet que si le rayon était formé de lumière ordinaire. Si un faisceau de lumière polarisée circulairement était reçu perpendiculairement sur un cristal biréfringent, l'onde polarisée se décomposerait, et, pour comprendre facilement le résultat de cette décomposition, remplaçons ce système d'ondes par les deux systèmes d'ondes polarisées rectilignement qui l'ont produit. Ces deux systèmes d'ondes donneront chacun un système d'ondes polarisées dans la section principale et dans un plan perpendiculaire, et les images ordinaire et extraordinaire auront exactement la même intensité. En effet, si l'on désigne par i l'angle du plan de polarisation d'un des deux systèmes d'ondes avec la section principale du rhomboïde, les intensités des deux faisceaux polarisés dans la section principale et dans le plan perpendiculaire seront $a \sin i$ et $a \cos i$, et, en calculant l'intensité de la lumière produite par l'onde résultante au moyen de la formule du n° 1569, on trouve qu'elle est égale à a^2.

Mais si un faisceau polarisé circulairement traversait une plaque mince cristallisée, et si l'on recevait la lumière au moyen d'un analyseur quelconque, la lumière se colorerait comme si le faisceau incident était polarisé en ligne droite, mais les teintes seraient différentes, et elles suivraient d'autres lois. En effet, nous avons vu que, quand deux faisceaux de lumière de même intensité polarisés à angle droit traversaient une mince plaque cristallisée, les images ordinaire et extraordinaire qu'on apercevait à travers un rhomboïde de chaux carbonatée étaient formées de la superposition de deux images complémentaires, et paraissaient blanches dans la lumière blanche ou de la même intensité dans la lumière homogène. Mais cela suppose nécessairement que les

deux faisceaux incidents polarisés à angle droit n'ont aucune différence de marche : car, s'il n'en était pas ainsi, tout se passerait comme si la différence de marche n'existait pas, et que pour un des faisceaux la lame mince eut une autre épaisseur.

Ainsi, les deux caractères de la lumière polarisée circulairement, au moyen desquels on peut facilement la distinguer de la lumière naturelle et de la lumière polarisée en ligne droite, sont 1° de donner deux images d'égale intensité à travers un cristal épais biréfringent, ou une image d'une intensité constante à travers un analyseur quelconque; 2° de se colorer en traversant des lames minces cristallisées et ensuite un cristal biréfringent ou un analyseur quelconque.

1645. Vérifions maintenant si la lumière polarisée circulairement jouit de ces propriétés, et commençons par examiner comment nous pourrons la produire. La méthode la plus simple consiste à faire passer un faisceau de lumière polarisée à travers une plaque mince cristallisée, par exemple de mica, de manière que le plan de polarisation fasse un angle de 45° avec la section principale : les deux faisceaux émergents seront égaux, polarisés dans deux plans rectangulaires, et la différence de marche dépendra de la nature et de l'épaisseur de la lame cristallisée; mais, en faisant tourner la lame autour d'une ligne perpendiculaire au plan primitif de polarisation, dans un sens ou dans l'autre, on parviendra toujours à rendre la différence de marche égale à un nombre impair de quarts d'ondulation et, par conséquent, la lumière émergente sera polarisée circulairement. Or, on a trouvé que les rayons ainsi polarisés circulairement, et ceux qui l'ont été par d'autres moyens que nous indiquerons bientôt, jouissent tous des propriétés que la théorie leur assigne.

1646. Je dis maintenant qu'un faisceau de lumière polarisée rectilignement peut toujours être divisé en deux faisceaux égaux polarisés circulairement et en sens contraire.

En effet, la résultante de deux systèmes d'ondes ayant le même plan de polarisation est donnée par la formule

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda}.$$

Si on pose $a = a'$, et $\frac{c}{\lambda} = \frac{1}{4}$, il vient

$$\cos 2\pi \frac{c}{\lambda} = \cos \frac{\pi}{2} = 0, \quad A^2 = 2a^2, \quad \text{et} \quad a = \frac{A}{\sqrt{2}}.$$

Ainsi une onde d'une intensité A peut être décomposée en deux autres ayant une différence de marche d'un quart d'ondulation et dont les intensités sont $A : \sqrt{2}$. Et, pour que l'onde résultante occupe exactement le lieu de l'onde primitive, il est évident que les ondes composantes doivent être symétriquement placées en avant et en arrière, c'est-à-dire l'une en avant de $\lambda : 8$, et l'autre en arrière de la même quantité. Mais chaque faisceau polarisé peut être décomposé en deux autres égaux, polarisés dans deux plans rectangulaires entre eux, inclinés de 45° sur le plan primitif, et dont les intensités sont $a : \sqrt{2}$. Ainsi un même faisceau polarisé d'intensité a peut être décomposé en

quatre faisceaux égaux, ayant pour intensité $a : 2$, deux en avant, à une distance $\lambda : 8$, polarisés dans deux plans rectangulaires, inclinés de 45° sur le plan primitif; et deux en arrière, de la même quantité, polarisés dans les mêmes plans; mais, en combinant ceux qui sont polarisés dans des plans rectangulaires, il en résulte évidemment deux faisceaux polarisés circulairement, l'un de droite à gauche, l'autre de gauche à droite.

1647. Il est d'ailleurs facile de reconnaître qu'une molécule d'éther qui serait soumise à ces deux systèmes d'ondes vibrerait dans un même plan. En effet, considérons une molécule d'éther O (fig. 935) soumise à l'influence de deux systèmes d'ondes égales, polarisées circulairement, et se propageant avec la même vitesse : il est évident que, pour avoir la direction de la force qui sollicitera à chaque instant la molécule, il faudra par le point O mener des lignes parallèles aux directions des mouvements qu'aurait au même instant cette même molécule si elle n'était soumise qu'à l'action d'un seul des deux systèmes d'ondes. Soit BACD le cercle que décrirait la molécule dans un sens ou dans l'autre si elle n'éprouvait que l'influence d'un des systèmes d'ondes, et soit AO la direction du mouvement dans le plan primitif de polarisation; soit B la position qu'occuperait la molécule à un certain instant sous l'influence du premier système; sous l'influence seule du second, parti en même temps de la surface du corps, la molécule serait en C, et on aurait $AB = AC$: alors, si par le point O on mène des droites parallèles aux tangentes au cercle aux points A et C, la résultante des forces égales dirigées suivant ces lignes sera celle qui sollicitera la molécule O; or cette résultante sera dirigée suivant OA; par conséquent, le plan de polarisation ne sera pas changé.

Supposons maintenant qu'un des deux systèmes d'ondes, le premier, par exemple, se meuve plus vite que l'autre : au même instant, si la molécule d'éther était soumise seulement à l'influence du premier, elle serait en B (fig. 936), et en C si elle n'était sollicitée que par le second, et on aurait $AB > AC$. La résultante des forces qui solliciteront la molécule O divisera comme précédemment, à cet instant et dans les instants suivants, l'angle BOC en deux parties égales; mais cette direction de la résultante fera avec AO un angle proportionnel à l'épaisseur du corps traversé en même temps par les deux ondes et à la différence des vitesses, et la rotation du plan de polarisation sera égale à la moitié de la différence des arcs AB et AC.

Tout cela suppose que les vitesses de rotation en sens contraire sont égales; mais c'est ce qui existe toujours, quelle que soit la vitesse de transmission : car la durée de la rotation est égale à celle d'une vibration du corps lumineux; seulement, à mesure que la vitesse diminue, la longueur de l'onde polarisée circulairement diminue, mais elle emploie toujours le même temps pour passer à travers un plan perpendiculaire à la direction du mouvement de rotation.

1648. Il résulte de là que, s'il existe des corps qui propagent avec des vitesses différentes les ondes polarisées circulairement de droite à gauche et de gauche à droite, un rayon de lumière polarisée éprouvera à sa sortie une déviation de son plan de polarisation proportionnelle à l'épaisseur du corps : explication bien simple des phénomènes singuliers que présentent le cristal de roche taillé perpendiculairement à l'axe, et plusieurs liquides. Mais Fresnel

ne s'est point borné à cet aperçu, il a démontré, par des expériences précises, que dans le quartz un faisceau de lumière polarisée ordinaire se divise réellement en deux autres polarisés circulairement en sens contraire, et qui le parcourent avec des vitesses différentes. Il prit trois prismes de cristal de roche, A, B, C (fig. 937); les faces MN et MP du prisme A étaient inclinées entre elles de 152°, les axes optiques des trois prismes étaient parallèles entre eux et perpendiculaires aux faces QN et RP des prismes extrêmes; les prismes B et C avaient été tirés d'un cristal qui faisait tourner le plan de polarisation dans un sens contraire à celui qui avait servi à former le prisme A. Lorsqu'on fait traverser le système des trois prismes, parallèlement à l'axe, par un faisceau de lumière polarisée, on aperçoit deux images, et les deux faisceaux émergents sont polarisés circulairement. La disposition des trois prismes avait pour objet d'augmenter la déviation des deux faisceaux, déviation qui aurait été insensible dans un seul prisme. On se rendra facilement compte de l'influence de la disposition en question sur la déviation en suivant la marche du rayon dans les prismes. En effet, le rayon polarisé, en entrant par la face RP, se divise en deux rayons polarisés circulairement, l'un de gauche à droite, l'autre de droite à gauche : ces deux faisceaux doivent un peu diverger dans le premier prisme; mais la divergence est beaucoup augmentée en traversant le second, puisque le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est égal au rapport des vitesses dans le premier et le second milieu; à l'entrée dans le troisième la divergence augmente encore, parce que la différence des vitesses change encore de signe.

1649. Ainsi, de même que la lumière naturelle se divise en deux faisceaux polarisés, l'un parallèlement, l'autre perpendiculairement à la section principale, et que l'inégalité de vitesse de transmission constitue la double réfraction ordinaire, de même un faisceau polarisé rectilignement peut être considéré comme composé de deux faisceaux polarisés circulairement en sens contraire, et c'est l'inégalité de vitesse de la transmission de ces faisceaux qui constitue la double réfraction rotative dont jouissent certains corps.

1650. L'indice de double réfraction circulaire peut facilement se déduire de l'angle de rotation du plan de polarisation pour une épaisseur donnée. En effet, nous avons vu précédemment que la rotation du plan de polarisation était moitié de l'arc dont un des deux systèmes était en avance sur l'autre; or, si le retard était égal à la moitié d'une longueur d'ondulation, dans l'épaisseur de la lame, il y aurait m longueurs d'ondulation du système qui va le plus vite, et $m + \frac{1}{2}$ ondulations de celui qui marche le plus lentement, et la déviation du plan de polarisation serait de 90°. Cela posé, représentons par e l'épaisseur du corps qui produirait une déviation de 90°, par λ et λ' les longueurs d'ondulation des deux rayons polarisés circulairement : on aura

$$e = m\lambda, \quad \text{et} \quad e' = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda',$$

et, par suite,

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{e}{e' - \frac{1}{2}\lambda'}.$$

Pour toutes les substances connues, ce rapport diffère très-peu de l'unité : par exemple, pour le quartz, celle de toutes les substances connues qui produit la plus grande déviation du plan de polarisation, et en supposant que la longueur d'ondulation du rayon rouge parallèlement à l'axe soit la valeur de λ', et prenant 3/2 pour l'indice de ce rayon, M. Babinet a trouvé que le rapport de λ à λ' était celui de 1,00003 à 1.

1651. La différence des vitesses de propagation des deux rayons polarisés circulairement en sens contraire, dans lesquels un rayon polarisé ordinaire se divise en pénétrant normalement dans une plaque de cristal de roche, taillée perpendiculairement à l'axe, ne subsiste que pour des inclinaisons très-petites autour de l'axe : aussi la rotation du plan de polarisation n'a lieu que pour la partie centrale, qui, dans la lumière blanche et une épaisseur suffisante du cristal, a une teinte uniforme, parce qu'alors les croix correspondantes aux différentes teintes se trouvent réparties dans toute l'étendue du champ. Les anneaux proviennent de la lumière non polarisée circulairement, car pour cette partie du champ les croix noires et blanches subsistent, quoiqu'en général plus faibles que dans les cristaux où les croix se prolongent jusqu'au centre. On conçoit facilement, d'après cela, que le diamètre de la partie centrale d'une teinte uniforme est d'autant plus grande que les rayons qui arrivent à l'œil sont moins convergents. Lorsque la plaque est très-mince, les plans de polarisation n'ont tourné que d'un petit angle : alors les croix des différentes teintes diffèrent peu, et leur superposition partielle produit une croix colorée à branches larges dans la position de l'analyseur où un autre cristal perpendiculaire à l'axe donnerait une croix noire. Les effets singuliers qui se produisent quand on superpose deux plaques minces de quartz qui tournent en sens contraire n'ont point été étudiés. Il est évident qu'on pourrait obtenir la teinte des images ordinaire et extraordinaire de la partie centrale des plaques épaisses de quartz, en déterminant d'abord par les formules (a) et (b) les intensités des images de différentes teintes, en prenant pour i les valeurs qui leur correspondent, et en cherchant la teinte résultante par la méthode de Newton : toutes les images élémentaires étant complémentaires, il en sera de même des images finales.

1652. M. Airy a démontré, par le calcul et par l'expérience, que dans le quartz les deux rayons inclinés sur l'axe ne possédaient point la polarisation rectiligne, comme on l'avait cru jusqu'alors. Les rayons ont tous les deux, et pour toutes les inclinaisons sur l'axe optique, une polarisation elliptique, le grand axe étant pour l'un des rayons dans la section principale, et l'autre dans une direction perpendiculaire à ce plan; dans l'un le mouvement de rotation est dirigé vers la droite, et dans l'autre vers la gauche : le rapport des axes diminue à mesure que les rayons se rapprochent de l'axe, et la polarisation devient circulaire quand les rayons sont parallèles à l'axe (*Transactions de Cambridge*, 1832).

1653. *Interférence des rayons polarisés circulairement.* Lorsqu'on fait interférer des rayons égaux polarisés circulairement en sens contraire, on n'obtient pas de franges à l'œil nu, parce que, quelle que soit la différence des chemins, l'intensité de la lumière et constante : en effet, les deux rayons

polarisés circulairement peuvent toujours être décomposés chacun en deux systèmes d'ondes polarisées rectilignement dans deux plans rectangulaires, et dont l'un est en avance sur l'autre d'un quart d'ondulation. Désignons par M et N les plans de polarisation, par a et a', b et b', les ondes élémentaires polarisées dans les plans M et N, a et b formeront le premier rayon polarisé circulairement, a' et b' le second; mais, comme les rayons sont polarisés en sens contraire, a est en avance sur a', et b' sur b, de $\lambda/4$. Supposons que le premier rayon prenne sur le second une avance de c longueurs d'ondulation, les rayons a et a' auront une différence de marche $c + 1/4$, le rayon b aura une avance de $c - 1/4$, et la résultante A des ondes a et a' sera donnée par l'équation

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda}$$

Dans le cas dont il s'agit,

$$a = a', \quad c : \lambda = c + \frac{1}{4}, \quad \cos 2\pi \frac{c}{\lambda} = -\sin 2\pi c,$$

et, par suite, $$A^2 = 2a^2 (1 - \sin 2\pi c).$$

Pour les rayons qui sont polarisés dans le plan N on trouverait de même

$$A'^2 = 2a^2 (1 + \sin 2\pi c).$$

Je dis maintenant que ces deux résultantes sont d'accord, c'est-à-dire qu'elles n'ont aucune différence de marche : en effet, rapportons les différences de marche au rayon a', le rayon a aura une différence de marche $c + 1/4$; mais, les ondes ayant la même intensité, la résultante sera au milieu de l'intervalle, et son excès de marche sera $c/2 + 1/8$. Pour le rayon b, il se trouvera en avance sur b' de $c - 1/4$, et la résultante seulement de $c/2 - 1/8$; mais, comme b' est en avance sur b de $1/4$, l'avance de la résultante sur a' sera $c/2 - 1/8 + 1/4 = c/2 + 1/8$. Alors les résultantes n'ayant aucune différence de marche, la résultante finale s'obtiendra comme la résultante des forces ordinaires, et l'intensité de la lumière sera égale à la somme des carrés des intensités des ondes; or, cette somme est évidemment indépendante de c.

Mais si l'on observait avec un prisme biréfringent l'espace où les rayons se croisent, lorsque la section principale serait parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, une des deux images donnerait des franges, parce qu'une différence de marche de $1/2\lambda$ transforme les deux faisceaux polarisés circulairement en un seul polarisé rectilignement dans le plan primitif. En effet, d'après ce qui précède, les résultantes A et A' des ondes élémentaires polarisées dans les plans M et N seront toujours d'accord, quel que soit c, et la résultante finale des mouvements élémentaires divisera en deux parties égales l'angle des plans perpendiculaires aux plans de polarisation M et N quand les valeurs de A et de A' seront égales, c'est-à-dire quand la valeur de c sera telle, que $\sin 2\pi c = 0$, or, cela arrivera pour $c = 0$, et pour $c = 1/2$, $2/2$, $3/2$, etc. Ainsi, pour tous les points de l'espace où se croiseront des rayons égaux polarisés circulairement en sens contraire, pour lesquels la diffé-

rence de marche sera un multiple quelconque pair ou impair de $1/2\ \lambda$, la lumière sera polarisée dans le sens du plan primitif de polarisation, et par conséquent ces points paraîtront obscurs dans l'image extraordinaire ou dans l'image ordinaire, suivant que la section principale du rhomboïde sera parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation.

M. Babinet produit les phénomènes d'interférence dont il s'agit par une méthode très-simple : il place une lumière derrière une plaque percée d'une fente étroite, en avant une plaque de tourmaline destinée à polariser la lumière, à un mètre de l'ouverture une plaque de verre formant un prisme d'un angle très-voisin de 180° (fig. 851 A); deux petites lames de mica, placées au delà de la plaque de verre, polarisent circulairement et en sens contraire les deux faisceaux émergents. Pour que les deux faisceaux soient polarisés circulairement, on fait varier l'inclinaison des lames de mica jusqu'à ce que la lumière émergente donne deux images de même intensité à travers un rhomboïde, et, pour qu'ils soient polarisés circulairement en sens contraire, il suffit que les sections principales des lames de mica soient perpendiculaires. M. Babinet a proposé de mesurer les indices de réfraction circulaire par le déplacement des franges qui résulte de l'interposition d'une plaque perpendiculaire à l'axe, ou d'un tube terminé par deux glaces parallèles renfermant le liquide, et suivant la marche indiquée [1578]. Cette méthode permet de mesurer des différences de vitesse qui seraient inappréciables par la déviation des prismes.

1654. *Effet produit par des réflexions totales.* Les formules qui représentent l'intensité du rayon réfléchi sont applicables pour toutes les incidences quand le second milieu est plus dense que le premier ; mais, dans le cas contraire, elles ne peuvent s'appliquer que jusqu'à l'incidence qui produit une réflexion totale ; au delà, ces formules deviennent imaginaires. Mais Fresnel, en interprétant de la manière la plus probable ce que l'analyse indiquait par ces formes imaginaires, a reconnu que la lumière polarisée et réfléchie totalement conservait son plan de polarisation quand le plan primitif de polarisation était parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion ; mais que, pour toute autre position du plan primitif, la lumière réfléchie peut toujours être représentée par deux faisceaux polarisés, l'un dans le plan de réflexion, l'autre dans une direction perpendiculaire, et qui diffèrent dans leur marche d'une certaine fraction d'ondulation qui dépend de l'angle d'incidence. Les deux faisceaux ont la même intensité quand le plan primitif de polarisation fait un angle de 45° avec le plan de réflexion. La différence de marche augmente depuis l'incidence où commence la réflexion complète, jusqu'à une certaine limite, et décroît ensuite jusqu'à l'incidence de 90° ; l'angle sous lequel la différence de marche est à son maximum dépend du rapport de réfraction des deux milieux en contact.

La différence de marche produite par une seule réflexion entre les deux faisceaux réfléchis, polarisés parallèlement et perpendiculairement au plan de réflexion est une fraction d'ondulation représentée par $\frac{\varphi}{2\pi}$, φ étant déterminé par la formule

$$\cos\varphi = \frac{2n^2\sin^4 i - (n^2+1)\sin^2 i + 1}{(n^2+1)\sin^2 i - 1}.$$

Fresnel a vérifié ces formules en calculant l'angle d'incidence pour lequel la lumière incidente polarisée à 45° serait polarisée circulairement après deux, trois, quatre réflexions dans le verre, et quatre dans le verre lorsque pour les deux premières le verre est sec et qu'il est mouillé pour les deux dernières; l'expérience a parfaitement confirmé les indications de la théorie. Pour le verre de Saint-Gobin, dont Fresnel s'est servi, l'indice est 1,51; et l'angle d'incidence pour une dépolarisation complète après deux réflexions est de 48°,37′ ou 54°,37′; pour trois réflexions l'incidence est de 43°,11′ ou 69°,12′; pour quatre réflexions l'incidence est de 40°,20′ ou 74°,42; enfin pour les quatre réflexions, dont deux sur le verre mouillé, l'incidence est de 68°,27′. Les images ne sont blanches que pour les plus grandes incidences, attendu que, les plus petites étant trop voisines des limites où commence la réflexion totale pour les différents rayons colorés, les intensités relatives des rayons réfléchis ne sont plus les mêmes que dans la lumière blanche.

La lumière qui a été polarisée circulairement par un certain nombre de réflexions reprend exactement son plan primitif de polarisation par de nouvelles réflexions, sous le même angle, en même nombre, et dans un plan quelconque : ainsi, de la lumière qui a éprouvé le genre de modification dont il s'agit par deux réflexions reprend son état primitif après deux nouvelles réflexions ou quatre réflexions totales; après six elle retombe dans l'état où elle s'était trouvée après deux seulement, et ainsi de suite.

1655. On peut vérifier ces résultats pour le verre au moyen d'un parallélipipède ABCD, dont les angles dièdres obtus sont de 126°; lorsqu'on fait arriver perpendiculairement sur la face BC un rayon polarisé LM, il rencontre la face AB sous un angle de 54°; le rayon est réfléchi en totalité, il éprouve une seconde réflexion totale en N sur la face opposée, et sort perpendiculairement à la face AD; en dirigeant le parallélipipède de manière que les plans de réflexion soient inclinés de 45° sur le plan primitif de polarisation, le faisceau émergent est polarisé circulairement. Lorsqu'on place un autre parallélipipède de verre de mêmes dimensions sur la face AD du premier, le faisceau émergent, après les deux réflexions totales, reprend une polarisation complète dans un certain plan, quelle que soit la position du second plan de réflexion, et le plan de polarisation du rayon émergent coïncide avec le plan primitif de polarisation quand le plan de réflexion dans le second prisme coïncide avec le premier.

Fresnel a démontré que ce mode de polarisation circulaire était identique avec celui que produit le cristal de roche dans la direction de son axe : car, en soumettant à deux réflexions totales et successives les deux rayons émergents des trois prismes de cristal de roche (fig. 937), après leur émergence ils se sont trouvés polarisés, l'un à 45° à droite du plan de réflexion, l'autre à 45° à gauche.

1656. *Polarisation circulaire produite par la réflexion sur les métaux.* Tous les faits que nous allons rapporter ont été découverts par M. Brewster. Pour les observer il se servait de deux plaques métalliques planes et très-polies, d'environ un pouce de longueur et d'un demi-pouce de largeur, placées parallèlement, dont on pouvait faire varier à volonté la distance, et par suite

le nombre des réflexions qu'un rayon de lumière, sous une même incidence, éprouvait avant de sortir de l'intervalle des plaques. Voici les résultats auxquels il a été conduit :

1°. Lorsqu'on emploie de la lumière naturelle, il y a toujours une certaine quantité de lumière polarisée dans le plan d'incidence ; cette quantité augmente avec le nombre des réflexions : pour l'acier, sous une incidence de 75°, la lumière est complétement polarisée après huit réflexions ; pour l'argent, sous une incidence de 73°, après trente-six réflexions seulement.

2°. Lorsque le rayon incident est polarisé dans un plan parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion, le rayon réfléchi est polarisé en totalité dans le même plan ; mais, dans toute autre position du plan de polarisation du rayon incident, la lumière réfléchie éprouve une modification analogue à celle qu'elle éprouve par la réflexion totale en dedans du verre.

3°. Lorsque le plan de polarisation fait un angle de 45° avec le plan de réflexion, sous une certaine incidence, différente pour les différents métaux, le rayon est polarisé circulairement après 1, 3, 5, 7, etc., réflexions, et il est ramené à un même plan de polarisation après un nombre pair de réflexions ; mais le plan de polarisation du rayon réfléchi ne coïncide pas avec celui du rayon incident, et sa position varie avec le nombre des réflexions : l'angle qu'il forme avec le plan de réflexion diminue à mesure que le nombre des réflexions augmente, et finit par devenir nul.

Les angles d'incidence correspondants à la polarisation circulaire, après une seule ou un nombre impair de réflexions pour les différents métaux, sont les suivants :

Étain fondu	78° 30′	Acier	75° 00′
Mercure	78 27	Bismuth	74 50
Galène	78 10	Argent pur	73 00
Pyrite de fer	77 30	Zinc	72 30
Cobalt gris	76 56	Étain battu	70 50
Métal des miroirs	76 00	Or des bijoux	70 45
Antimoine	75 35		

Le tableau suivant donne la position du plan de polarisation pour différents métaux après deux réflexions :

Argent pur	39° 48′	Métal des miroirs	21° 00′
Argent commun	36 00	Zinc	19 10
Or pur	35 00	Acier	17 00
Or des bijoux	33 00	Pyrite de fer	14 00
Etain fondu	33 00	Antimoine	16 15
Bronze	32 00	Cobalt arsenical	13 00
Étain laminé	31 00	Cobalt	12 30
Cuivre	29 00	Plomb	11 00
Mercure	26 00	Galène	2 00
Platine	22 00	Fer spéculaire	0 00
Bismuth	21 00		

Le tableau suivant donne les positions du plan de polarisation du rayon réfléchi, après un certain nombre de réflexions, pour l'acier et l'argent :

Nombre des réflexions.	Acier.	Argent.
2.....	— 17° 00'.....	— 38° 15'
4.....	+ 5 22.....	+ 31 52
6.....	— 1 38.....	— 26 6
8.....	+ 0 30.....	+ 21 7
10.....	— 0 9.....	— 16 36
12.....	+ 0 3.....	+ 13 40
18.....	— 0 0.....	— 6 42
36.....	+ 0 0	+ 0 47

La lumière naturelle pouvant être considérée comme composée de deux faisceaux égaux polarisés dans deux plans inclinés de 45° sur le plan de réflexion, on voit pourquoi la polarisation est complète dans le plan d'incidence après huit réflexions sur l'acier, et seulement après trente-six sur l'argent.

Pour des angles d'incidence plus grands ou plus petits que ceux qui produisent la polarisation circulaire, après une seule réflexion, le rayon réfléchi peut être ramené à un même plan de polarisation après n, $2n$, $3n$, $4n$, etc., réflexions, n étant un nombre entier : par exemple, pour l'acier, sous les incidences

$$86°,\ 84°,\ 82°\ 20',\ 79°,\ 75°,\ 67°\ 40',\ 60°\ 20',\ 56°\ 25',\ 52°\ 20',$$

les nombres de réflexions qui ramènent le rayon réfléchi à un plan unique de polarisation, ou les valeurs de n, sont

$$6,\ 5,\ 4,\ 3,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6.$$

Lorsque le nombre des réflexions est pair, la moitié de ce nombre donne celui des réflexions auxquelles le rayon prend la polarisation circulaire ; lorsqu'il est impair, M. Brewster admet que la polarisation circulaire se produit lorsque le rayon a atteint la plus grande profondeur dans la plaque métallique.

M. Brewster considère l'angle d'incidence sous lequel les métaux réfléchissent, avec la polarisation circulaire, les rayons polarisés dont le plan de polarisation fait un angle de 45° avec le plan de réflexion, comme représentant l'angle de polarisation, et sa tangente comme la mesure de l'indice.

Dans la polarisation circulaire produite par la réfraction totale dans le verre, le rayon polarisé circulairement est ramené à un même plan de polarisation par le même nombre de réflexions sous le même angle, quelle que soit l'inclinaison du plan du second système de réflexions sur le premier ; mais, dans la polarisation circulaire produite par les métaux, l'angle de réflexion qui ramène le rayon à un même plan de polarisation varie avec l'angle des plans de réflexion. Cette considération a conduit M. Brewster à désigner sous le nom de *polarisation elliptique* la polarisation produite par les métaux ; mais il n'est point démontré que cette désignation a réellement la signification que nous lui avons assignée précédemment.

M. de Senarmont, ingénieur des mines, a fait d'importantes recherches sur la polarisation de la lumière par réflexion sur les métaux (*A. C.* et *P.*, t. LXXIII, 1840); et plus récemment, M. Jamin a fait un travail très-étendu sur les phénomènes que présentent les lames métalliques couvertes de couches oxydées très-minces, et sur les phénomènes généraux de la polarisation par les métaux (*C. R.*, t. XXI, XXII et XXIII).

1657. Nous renvoyons, pour plus de détails, aux nombreux mémoires publiés par Fresnel dans les *Annales de Physique et de Chimie*, et dans les recueils de l'Académie des sciences, et surtout à l'exposé si remarquable que Fresnel a fait lui-même d'une partie de cette belle théorie dans le supplément à la traduction française du *Système de chimie* de Thomson, imprimé en 1822, d'où nous avons extrait une partie de ce que nous avons dit. Nous finirons en citant le passage qui termine ce mémoire.

« Pour calculer les phénomènes si variés de la diffraction, celui des anneaux produits par une mince lame d'air ou d'eau, ou de tout autre milieu réfringent; la réfraction même, dans laquelle le rapport du sinus d'incidence au sinus des rayons réfractés est précisément celui des longueurs d'ondulation dans les deux milieux; les couleurs et les singuliers modes de polarisation que présentent les lames cristallisées, il suffit de connaître les diverses longueurs d'ondulation de la lumière dans les milieux qu'elle traverse; c'est la seule quantité qu'on soit obligé d'emprunter à l'expérience, et elle est la base de toutes les formules. Si l'on fait attention à ces relations intimes et multipliées que la théorie des ondulations établit entre les phénomènes les plus différents, on doit être frappé à la fois de sa simplicité et de sa fécondité, et convenir, que lors même qu'elle n'aurait pas sur le système de l'émission l'avantage d'expliquer plusieurs faits absolument inconcevables dans celui-ci, elle mériterait déjà la préférence par les moyens qu'elle donne de lier entre eux tous les phénomènes de l'optique en les embrassant dans des formules générales. »

Il faudrait maintenant ajouter à l'énumération des phénomènes qui sont des conséquences nécessaires de l'hypothèse des ondulations, ceux que présentent les réseaux et les cristaux jouissant de la double réfraction, et surtout ces derniers qui ont conduit Fresnel à la détermination de la surface des ondes dont les circonstances les plus singulières ont été constatées par l'expérience.

« Sans doute, il reste encore beaucoup de points obscurs à éclaircir, surtout ceux qui tiennent à l'absorption de la lumière,

tels que la réflexion sur les surfaces métalliques et les corps noirs, le passage de la lumière à travers les corps imparfaitement transparents et les couleurs propres des corps. Il est probable que, dans ces différents cas, une partie de la lumière se trouve dénaturée et changée en vibrations calorifiques, qui ne sont plus sensibles pour nos yeux, parce qu'elles ne peuvent plus en pénétrer la substance ou faire vibrer le nerf optique à leur unisson, en raison des modifications qu'elles ont éprouvées. Mais la quantité totale de force vive doit rester la même, à moins que la lumière n'ait produit un effet chimique ou calorifique assez puissant pour changer l'état d'équilibre des particules des corps, et, avec lui, l'intensité des forces auxquelles elles sont soumises : car on conçoit que, si ces forces s'affaiblissaient tout à coup, il en résulterait une diminution subite dans l'énergie des oscillations des particules du corps échauffé, et, par conséquent, une absorption de chaleur, pour me servir de l'expression usitée. C'est peut-être ainsi que les choses se passent quand un solide se liquéfie, ou quand un liquide se vaporise.

« Si la lumière n'est qu'un certain mode de vibration d'un fluide universel, comme les phénomènes de la diffraction le démontrent, on ne doit plus supposer que son action chimique sur les corps consiste dans une combinaison de ses molécules avec les leurs, mais dans une action mécanique que les vibrations de ce fluide exercent sur les particules pondérables, et qui les oblige à de nouveaux arrangements, à de nouveaux systèmes d'équilibre plus stables pour l'espèce, ou l'énergie des vibrations auxquelles elles sont exposées. On voit combien l'hypothèse qu'on adopte sur la nature de la lumière et de la chaleur peut changer la manière de concevoir leurs actions chimiques, et combien il importe de ne pas se méprendre sur la véritable théorie, pour arriver enfin à la découverte de la mécanique moléculaire, dont la connaissance jetterait un si grand jour sur la chimie. Si quelque chose doit contribuer puissamment à cette grande découverte, et révéler les secrets de la constitution intérieure des corps, c'est l'étude approfondie des phénomènes de la lumière. »

ADDITIONS.

Sur les pouvoirs émissifs. La détermination des pouvoirs émissifs par la méthode du refroidissement dans le vide suppose que l'on peut trouver avec exactitude la fraction de degré que perd un thermomètre dans un temps très-court par l'effet du seul rayonnement. On n'arrive à cette appréciation qu'en faisant subir aux abaissements de température, observés dans de l'air raréfié, de nombreuses et importantes corrections, dont l'une a précisément pour but d'estimer la part que prend au refroidissement cet air qu'il est impossible d'extraire entièrement des enceintes où l'on opère. Or, s'il existait des substances pour lesquelles, même sous les faibles pressions, l'effet de l'air fût très-supérieur à celui du rayonnement, les moindres incertitudes sur la forme de la loi du refroidissement dû au contact de ce fluide, ou sur la grandeur des coefficients qui entrent dans son expression, conduiraient à des résultats très-erronés dans la détermination du rapport des pouvoirs émissifs de ces substances à celui du noir de fumée. Ces considérations ont conduit MM. de la Provostaye et P. Desains à faire, avec l'appareil thermo-électrique, de nouvelles expériences sur la détermination du pouvoir émissif des métaux. Les nombres qu'ils ont obtenus sont très-différents de ceux qui étaient admis jusqu'à ce jour. Ils ont trouvé en représentant par 100 la valeur du pouvoir émissif du noir de fumée :

Pour l'argent en lames ou en feuilles.....	2 ou 3
Pour l'argent chimiquement déposé et non bruni...	5
Pour l'or.....	4
Pour le platine.....	9,5

On ne pourrait arriver à ces résultats en comparant immédiatement les déviations produites par une surface de même étendue successivement argentée et noircie, et maintenue d'ailleurs à une température constante, parce que si la déviation observée dans le premier cas avait une grandeur convenable, celle que l'on obtiendrait dans le second serait beaucoup trop forte. Pour éluder cette

difficulté, quand la surface rayonnante était noircie, on interceptait la plus grande partie des rayons émis vers la pile à l'aide d'un diaphragme étroit; des expériences antérieures ayant appris dans quelle proportion l'interposition de ce diaphragme diminuait le flux de chaleur incident, il était facile de ramener l'effet obtenu à ce qu'il eût été si la portion de surface vue de la pile avait eu la même étendue dans les deux expériences comparatives. Une méthode d'observation différente, mais toujours indépendante de l'influence inconnue de l'air, a conduit aux mêmes résultats. La valeur 0,03, que ces expériences assignent au rapport des pouvoirs émissifs de l'argent et du noir de fumée, est cinq fois plus faible que la valeur 0,15 que l'on déduit pour le même rapport d'observations de refroidissement. Comme le premier de ces deux nombres est donné par un procédé direct, on doit lui accorder la préférence, et dès lors il devient excessivement probable que la marche de calcul donnée par MM. Dulong et Petit pour séparer l'effet de l'air de celui du vide ne conduit pas à la véritable appréciation de ce dernier. Les erreurs, quelle qu'en soit la grandeur absolue, peuvent devenir très-graves lorsque le pouvoir émissif est très-faible; elles peuvent ôter sa signification physique au coefficient m de la formule

$$v = ma^{\theta}(a^{t} - 1) + np^{0,45}t^{1,233}.$$

Le premier terme du second membre, comme l'ont déjà remarqué MM. de la Provostaye et Desains, ne représente plus alors la vraie grandeur du refroidissement dans le vide; et la constance ou la variation de m n'entraîne pas nécessairement une loi physique particulière.

Dans une publication récente, les mêmes physiciens ont montré que les quantités de chaleur émises par un même élément dans des directions différentes ne sont pas, comme on l'admet en général, proportionnelles au sinus de l'angle formé avec la surface par la direction de l'émission. Cette proportionnalité ne paraît exister que pour les substances dont les pouvoirs réflecteurs et diffusifs sont indépendants de l'incidence. En un mot, pour le noir de fumée appliqué sans vernis, les quantités de chaleur émises parallèlement aux arêtes d'un cylindre par la section droite ou par une section oblique quelconque sont les mêmes; mais cette identité ne subsiste plus si la surface rayonnante est vitrée ou recouverte de blanc de céruse, d'ocre, etc. Dans le cas du verre, les variations de ces quantités sont soumises à une loi remarquable. Si de 0,94, qui d'après

M. Melloni représente, pour la direction normale, la somme des pouvoirs émissifs et réflecteurs du verre, on retranche les quantités de chaleur émise, dans des directions diverses, données par l'observation, on trouve des restes qui sont identiques aux nombres que le calcul de Fresnel et les expériences de Brewster donnent comme mesure des quantités de lumière réfléchies régulièrement sous les mêmes incidences.

Conductibilité des corps pour l'électricité dynamique. M. E. Becquerel a fait récemment un grand travail sur cet objet (*A. C. et P.*, t. XVII, 1846). Nous donnerons un résumé succinct des résultats qu'il a obtenus.

1°. La résistance des métaux écrouis sont indiqués dans le tableau suivant :

Argent	108	Palladium	1468
Cuivre	112	Fer	928
Or	83	Plomb	269
Cadmium	511	Platine	1321
Zinc	476	Mercure	1070
Étain	156		

2°. La conductibilité d'un métal diminue avec la température. De 0° à 100°, la résistance du cuivre, du plomb, et du fer augmente à peu près de 0,4.

3°. Les métaux recuits sont meilleurs conducteurs que les métaux écrouis.

4°. Les dissolutions salines peuvent se diviser en deux classes sous le rapport de la conductibilité. La première comprend les dissolutions dont le pouvoir conducteur augmente avec le degré de concentration jusqu'au point de saturation : le sulfate de cuivre et le chlorure de calcium sont dans ce cas. La seconde renferme les dissolutions de sels déliquescents, ou qui se dissolvent en grande quantité dans l'eau, et dont le pouvoir conducteur augmente d'abord avec le degré de concentration, atteint un maximum, puis diminue ensuite : le nitrate de cuivre et le sulfate de zinc, dissous dans l'eau, sont dans ce cas.

5°. Les dissolutions salines qui conduisent le mieux les courants électriques, leur présentent une résistance un million de fois plus grande que l'argent.

6°. La chaleur augmente la conductibilité des liquides.

Appareil de M. Soleil pour mesurer l'angle des axes des cristaux. Cet appareil, représenté fig. 1045, est mobile autour d'une char-

nière, qui permet de lui donner différentes inclinaisons. *a* est une glace de verre noir destinée à polariser la lumière incidente; *b* est une lentille convergente; *c* une plaque de liége renfermant la plaque de cristal, maintenue dans une pince annulaire; *d* est un petit cercle divisé à sa circonférence, et parcouru par un vernier fixé à l'axe de la pince; *e* est une loupe à deux verres; *f* un verre convergent; *g* une vis qui fait mouvoir deux fils très-fins parallèles; en *h* se trouve un second verre convergent, et en *i* un prisme de Nicol, qui peut tourner librement dans la douille *k*, et qui est entraîné par elle; un cercle divisé *l* permet de déterminer les positions de la section principale du prisme; *m* et *n* sont deux charnières, au moyen desquelles on peut donner à la pince qui porte la plaque deux mouvements rectangulaires.

Interférence des rayons dont les différences de marche correspondent à un grand nombre de longueurs d'ondulation. Nous avons dit que dans les circonstances ordinaires, quelque soin qu'on eût pris d'ailleurs pour opérer sur des rayons simples, toujours au delà d'une certaine différence de marche correspondant à un petit nombre de longuenrs d'ondulation, les phénomènes d'interférence cessaient de se manifester, parce que les rayons de même teinte apparente n'avaient pas tous exactement la même longueur d'ondulation. Mais les interférences peuvent se manifester en séparant les rayons à l'aide d'un prisme réfringent; et l'on peut constater le phénomène pour de très-grandes différences de marche. MM. Fizeau et Foucault ont pu reconnaître ainsi, dans des faisceaux refléchis par deux miroirs, des interférences correspondant à des différences de marche de plus de 1700 ondulations. Il y a pourtant une limite dans la différence de marche nécessaire à la manifestation des interférences, résultant des perturbations continuelles qu'éprouvent toutes les sources de lumière (*C. R.*, t. XXI).

Expérience de M. Wrède. On doit à M. de Wrède un phénomène assez curieux, qui est une conséquence nécessaire du principe des interférences. Une lame mince de mica contournée en cylindre est éclairée par une fente étroite : on aperçoit sur la surface une ligne lumineuse; mais si on la regarde à travers un prisme, on voit un grand nombre de franges très-fines alternativement noires et colorées. Ces franges proviennent évidemment des réflexions qui ont lieu à la première et à la seconde surface de la lame, et le prisme ne peut que les écarter. M. Arago a indiqué une modification de l'expérience qui devait vérifier cette explication, elle consiste à

placer la lame de mica sur une ouverture percée dans un petit cylindre creux en cuivre, et à faire l'expérience quand le cylindre est vide et ensuite rempli d'huile de cassia, dont l'indice de réfraction diffère peu de celui du mica ; dans cette dernière circonstance aucune réflexion ne pouvait avoir lieu à la seconde surface, et par conséquent les franges devaient disparaître. L'expérience exécutée par M. Soleil a confirmé la prévision de M. Arago.

Longueurs d'ondulation des rayons colorés correspondants aux différentes raies du spectre. Le tableau suivant résulte des expériences faites par M. Babinet, au moyen des réseaux.

	mm.
B	0,0006878
C	0,0006565
D	0,0005888
E	0,0005260
F	0,0004843
G	0,0004291
H	0,0003928

(*A. C. et P.*, t. XL.)

FIN DU TOME SECOND ET DERNIER.

FAUTES ESSENTIELLES A CORRIGER.

TOME PREMIER.

Pages.	Lignes.	
31	26	R, *lisez* r.
38	41	minutes, *lisez* secondes.
41	38	$:: \mathrm{PS} : 2\left(\frac{1}{2}\mathrm{P} + 2p\right)$, *lisez* $:: \mathrm{MS} : 2\left(\frac{1}{2}\mathrm{M} + 2m\right)$.
48	9	de plus petites, *lisez* de petites.
77	7	les termes qui renferment les carrés de α et de $\mathcal{C}$, *lisez* le produit $\alpha\mathcal{C}$.
85	17	proportionnelles, *lisez* proportionnels.
101	18	représentée, décomposée, *lisez* représenté, décomposé.
116	12	ont, *lisez* on.
127	26	qu'à la cohésion du liquide, *lisez* qu'à la cohésion du liquide et à.
140	4 et 5	$1/3\,l + 1/4$ de $2/3\,l = 1/2\,l$, *lisez* $1/3$ de $l + 1/4$ de $2/3$ de $l = 1/2$ de l.
187	12	auquel, *lisez* duquel.
210	39	$\frac{p'-f}{p-}$, *lisez* $\frac{p'-f}{p-f'}$.
244	4	aire, *lisez* faire.
259	2	$a\frac{p}{p-a}$, *lisez* $a \times \frac{p}{p-a}$.
293	7	en raison *inverse*, *lisez* en raison *directe*.
313	13	e tube, *lisez* le tube.
354	2	donne, *lisez* donnent.
354	24	leurs amplitudes, *lisez* l'amplitude de leurs vibrations.
370	5	$\mathrm{I} : \mathrm{I}' :: \frac{m}{4\pi\mathrm{R}^2} : \frac{m}{4\pi\mathrm{R}^2} :: \frac{1}{\mathrm{R}^2} : \frac{1}{\mathrm{R}'^2}$, *lisez* $\mathrm{I} : \mathrm{I}' :: \frac{m}{4\pi\mathrm{R}^2} : \frac{m}{4\pi\mathrm{R}'^2} :: \frac{1}{\mathrm{R}^2} : \frac{1}{\mathrm{R}'^2}$.
370	29	l'instrument éprouvant, *lisez* l'instrument éprouvait.
385	17	[47], *lisez* [471].
385	21	[47], *lisez* [471].
389	3	suivantes, *lisez* suivants.
404	3	de, *lisez* des.
405	28	leurs distances, *lisez* la distance.
413	14	$e^{d\sqrt{\frac{ph}{sk}}} = \mathrm{M}$; $e^{d'\sqrt{\frac{ph}{sk'}}} = \mathrm{M}'$, *lisez* $e^{d\sqrt{\frac{ph}{sk}}} = \mathrm{M}$; $e^{d'\sqrt{\frac{ph}{sk}}} = \mathrm{M}'$.

Pages.	Lignes.	
425	28	dans le gaz, *lisez* dans quelques gaz.
431	18	vibrations, *lisez* vitesses.
461	24	$\delta = 6480$, *lisez* $\delta = \frac{1}{6480}$.
467	31	$V'' = V\left(\frac{1+at''}{1+at'}\right)$, *lisez* $V'' = V'\left(\frac{1+at''}{1+at'}\right)$.
479	9	$H.\frac{P'-P}{D}$, *lisez* $H;\frac{P'-P}{D}$.
479	28	en fer-blanc, *lisez* en fer-blanc MN.
501	3	$b = \bar{1},4724984$, *lisez* $b = \bar{1},4724984$.
503	13	0,7600.... 1,033, *lisez* $0^{m},7600....$ $1^{kilogr.},033$
508	16	1^{g}, : 1,676, *lisez* 1^{g} : 1,696.
512	10	11,323, *lisez* $11^{gram.},323$.
512	32	devient, *lisez* deviennent.
616	9	$2h \times 1,92$, *lisez* $2h \times 0,96$.
616	11	1 centimètre : 1,92, *lisez* 1 centimètre : 0,96.
669	18	n et m', *lisez* q et p'.
675	18	répétés, *lisez* répétée.

TOME SECOND.

39	11	axe oblique, *lisez* axe optique.
50	6	l'amiral, *lisez* le capitaine.
75	30	expériences des, *lisez* des expériences.
87	33	quand liquide, *lisez* quand un liquide.
92	24	$R_1 = \mu V_2$, *lisez* $R_2 = \mu V_2$
161	26	que lames, *lisez* que les lames.
181	18	manière, *lisez* matière.
185	9	ou $R'm'$, *lisez* ou Rm'.
197	25	à un angle droit, *lisez* à angle droit.
205	3	était formé, *lisez* étant formé.
214	36	$Fc(\cos\theta_2 - \cos\theta)$, *lisez* $Fc(\cos\theta_2 - \cos\theta^1.)$
226	22	a sinus, *lisez* à sinus.
228	22	en sera, *lisez* ne sera.
276	7	M. Dore, *lisez* M. Dove.
320	27	que le fil, *lisez* que le fluide.
363	1	acile, *lisez* facile.
405	17	à ui seul, *lisez* à lui seul.
460	7	et doit être, *lisez* doit être.
461	25	par le apport, *lisez* par le rapport.
584	4	à face parallèle, *lisez* à faces parallèles.

TABLE

DES MATIÈRES DU TOME SECOND.

SECONDE PARTIE. — *FLUIDES IMPONDÉRABLES.*
(Suite.)

Pages.

CHAPITRE II. — *Magnétisme*..... 1

§ 1. Phénomènes généraux..... *ib.*
2. Lois des attractions et répulsions magnétiques..... 7
3. Détermination de la force magnétique des aimants..... 8
4. Distribution du magnétisme dans un barreau aimanté..... 10
5. Théorie du magnétisme..... 13
6. De l'aimantation..... 16
7. Action des aimants sur tous les corps..... 29
8. Effets magnétiques des corps en mouvement..... 31
9. Magnétisme terrestre..... 36

CHAPITRE III. — *De l'électricité statique*..... 55

§ 1. Phénomènes généraux..... *ib.*
2. Appareils électriques..... 81
3. Développement de l'électricité par la pression..... 115
4. Examen des circonstances qui accompagnent le développement de l'électricité par le frottement ou la pression..... 117
5. Électricité atmosphérique..... 133

CHAPITRE IV. — *Électricité développée par la chaleur dans les cristaux*..... 147

CHAPITRE V. — *Électricité dynamique*..... 150

§ 1. Phénomènes généraux..... *ib.*
2. Effets produits par la tension des pôles..... 169
3. Effets mécaniques produits par les courants sur les corps qu'ils traversent..... 173
4. Actions des courants les uns sur les autres et sur les aimants... 174
Action des courants les uns sur les autres..... 175
Action de la terre sur les courants..... 193
Action réciproque des courants et des aimants..... 196